



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

LA TRANSICIÓ VIA DE BALAST VIA EN PLACA

722 – TES – CA – 4121

Autor/a

Bergadà Fort, Miquel

Tutor/a

Lopez Pita, Andres

Departament

Infraestructura del Transport i del Territori

Intensificació

Transports

Data

21-05-2010

AGRAÏMENTS

La realització d'aquesta tesina ha estat possible gràcies a l'ajuda de totes les persones que han estat al meu costat, de forma incondicional, durant els mesos en que hi he estat treballant. No seria just per part meua no agrair-los-hi el suport mostrat, és per això que aquesta tesina està dedicada a ells.

En primer lloc vull donar les gràcies a la meua família per la fe cega dipositada en mi, ja que si estic fent una carrera universitària és gràcies a ells. Als meus pares Ramon Miquel i Paquita per dedicar una part de la seva vida a que jo pogués estar el millor possible i només m'hagués de preocupar dels estudis. A la meua germana Núria per mostrar-me dia rere dia que tot es pot superar per molt alta que sigui la muntanya. A les padrines Carme i Pepita per esperar-me sempre amb els braços oberts. Als cosins, tiets i resta de familiars per l'interès mostrat i la confiança. També m'agradaria tenir un record per dues persones que lamentablement ja no estan amb nosaltres: el Josep i el Jaume Bergadà. Tanmateix però, voldria donar la benvinguda al nounat de la família, el Marc, per veure com neix una nova vida.

A continuació he de donar les gràcies a la Marta per ajudar-me a superar els moments més difícils en els quals sense ella hagués estat molt més complicat sortir-se'n. Sempre m'ha regalat un somriure quan més ho necessitava i això és el que m'ha donat els ànims per mirar sempre endavant. Des de que l'he conegut la meua vida gira al seu voltant. A ella li dec la felicitat i els millors moments de la meua vida.

Sense cap mena de dubte també he d'agrair al meu tutor, el professor Andrés López Pita, tota la dedicació mostrada. Dir d'ell que és una gran persona és quedar-se curt, ha demostrat tenir tants coneixements, bondat i humilitat a la vegada només propi de veritables savis. Ha sabut en cada moment què és el que més em convenia per a la meua formació no solsament acadèmica. Li he d'agrair que confiés en mi per realitzar aquesta tesina i per despertar en mi l'interès en el món ferroviari, del qual ell n'és un dels màxims exponents.

Per altra banda he d'estar molt content dels amics que tinc ja que sempre m'han demostrat estar al meu costat, són qui m'han fet passar els moments més divertits i que m'han servit tant per esbargir-me com per mirar endavant. De tots ells vull fer una menció especial als de l'Albi per haver-me vist créixer i esperar-me sempre amb els braços oberts. A més a més no seria just oblidar-me dels companys de pis, són ells qui m'han vist dia rere dia i qui han demostrat un gran interès pel treball realitzat.

Finalment vull tornar agrair a la Marta Ballart, el Ramon Miquel Bergadà i el Josep Monné els moments que han dedicat a la meua tesina, ajudant-me en la realització i correcció de la mateixa.

A tots, moltes gràcies.

RESUM

Títol: La transició via de balast via en placa

Autor: Miquel Bergadà Fort

Tutor: Prof. Andrés López Pita

Paraules clau: transició, via de balast, via en placa, travessa, rigidesa vertical, assentament, qualitat geomètrica.

La transició entre la via de balast i la via en placa és un punt crític de les actuals línies de ferrocarril. Per tant, és necessari ubicar punts de contacte, de manera que el pas d'un tipus a un altre sigui el menys agressiu possible.

En aquesta tesina s'expliquen de forma general quins són els elements principals que formen l'engraellat d'una via. S'aprofundeix en la descripció dels elements, el procés de construcció i la secció tipus de la via sobre balast i la via sobre placa de formigó. S'ha considerat el sistema de via en placa Rheda2000 com la secció de referència a l'hora d'analitzar la via sobre placa.

Els següents capítols es centren en la transició en si. A partir de l'exemple dels túnels de Guadarrama es procedeix a determinar la longitud de transició que seria necessària en funció de la velocitat de circulació. Agafant com a base l'exemple esmentat, es divideix la transició en 4 zones segons la seva proximitat a un tipus de via o un altre.

A partir de les teories d'elasticitat de Winkler i la teoria del coeficient de rigidesa del recolzament s'obté la rigidesa vertical del conjunt de via, fet que permet determinar els assentaments que es produeixen una vegada s'ha modelitzat la transició amb un programa informàtic.

Una vegada realitzada la modelització, els resultats obtinguts han servit per determinar quins serien els assentaments màxims en cada tram prèviament descrit. S'ha considerat com a referència l'anivellació longitudinal que exigeix ADIF a les línies d'alta velocitat. Atès que l'objectiu d'una transició és unir dos tipus diferents de tecnologia de via s'ha considerat la recta que uneix els punts on es produeixen els assentaments màxims com a element de referència. Aquesta recta ve definida per un pendent on aquest paràmetre depèn de la longitud de la transició i de la diferència entre assentaments.

A partir de diferents aproximacions matemàtiques s'ha realitzat un ajust per tal d'obtenir una funció que a partir de la longitud de transició permeti determinar el pendent de la recta que formen els assentaments que es produeixen.

Per disposar de valors de referència s'han utilitzat les fórmules de Zimmerman per al càlcul d'assentaments. Aquests resultats teòrics s'han comparat amb els prèviament obtinguts en les modelitzacions realitzades amb el programa informàtic. Una vegada comparats els resultats s'ha constatat que pel tram de via sobre balast els valors concorden, però no així per la zona de via en placa. Això és degut a que les fórmules de Zimmerman van ser concebudes per a via sobre balast i no sobre placa.

Finalment es realitza una modificació en la transició que correspon a disminuir la distància entre travesses, passant dels 60 centímetres habituals als 55. Amb aquesta separació es procedeix com en els capítols anteriors i es realitza una modelització per determinar l'afectació que té en els assentaments.

ABSTRACT

Title La transició via de balast via en placa

Author: Miquel Bergadà Fort

Tutor: Prof. Andrés López Pita

Key words: transition, ballasted track, ballastless track, sleeper, vertical stiffness, settlements, longitudinal leveling requirements.

The transition between ballasted track and concrete track slab is a critical point of the current high speed railway lines. Therefore it is necessary to locate some special local contact points so that the transition from one type to another is as least aggressive as possible.

This thesis discusses which the main elements of a track in general are. The following step is to describe the elements, the construction process and the type section of the track ballasted firstly and then the concrete slab track. The Rheda2000 system it has been taken as the reference section when analyzing the concrete slab track.

The following chapters focus on the transition itself. Taken as example the Guadarrama tunnels, we proceeded to determine the length of transition that would be required depending on the speed. Moreover, it is described which would be the different parts that would set up the transition and its section is analyzed. Considering the previous example, the transition is divided in 4 zones according to their proximity to one or another type of track.

Taking into account the elasticity Winkler theory and the coefficient of rigidity of the rigid vertical support, it is possible to determinate the vertical stiffness of the all track. This parameter leads to the achievement to obtain the settlements that occur when the transition is calculated through software.

Once the simulating is done, the results obtained are used to determine which settlements would be the highest in each section previously described. As a reference, it has been considered the longitudinal leveling requirements at high speed lines of ADIF. As the purpose of a transition is to join two different types of track technology, it has been considered as a reference the line that joins the extreme points where it produces the maximum settlement. This line is defined by a slope where this parameter depends on the length of the transition and the difference between settlements.

From different mathematical approaches it has been done an adjustment in order to obtain a function. The aim of this function is to determine the slope of the straight line formed by the settlements that occur from the length of transition.

To compare and contrast the results previously obtained, it has been taken the Zimmerman's formulas to calculate the settlements of reference. Comparing those results it was found that for the ballasted track the values matched. Nevertheless, the results for the concrete slab track didn't match. This is because the Zimmerman's formulas were designed for ballasted track and not for any other kind of track.

Finally it is made a change in the transition that consists which consists in decreasing the distance between sleepers, changing the usual 60 to 55 centimeters. With this separation it follows the same procedure as in the previous chapters and a new simulating is done to get its affect on the settlements.

ÍNDEX

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS	3
1.1. Introducció	3
1.2. Objectius	4
1.3. Contingut del document	4
CAPÍTOL 2. ESTAT DEL CONEIXEMENT.....	5
2.1. Introducció.....	5
2.1.1. Parts de la via	5
2.1.2. Qualitat geomètrica d'una via.....	7
2.1.3. Esforços verticals sobre la via.....	9
2.1.3.1 Càlcul de la càrrega vertical dinàmica per roda	12
2.1.3.2. Àrea d'influència d'una càrrega	12
2.2. Via sobre balast.....	14
2.2.1. El balast	14
2.2.2. Les travesses	16
2.2.3. Subjeccions	17
2.2.4. Avantatges de la via sobre balast	18
2.2.5. Desavantatges de la via sobre balast	18
2.2.6. Procés constructiu, tècniques de muntatge	19
2.2.6.1. Diferències entre muntatge amb via auxiliar i sense aquesta.....	19
2.2.6.2. Procés constructiu	21
2.2.7. Secció tipus.....	26
2.3. Via sobre placa.....	28
2.3.1. Els diferents tipus de via sobre placa.....	28
2.3.2. El model RHEDA2000.....	30
2.3.2.1. Exemples d'utilització	32
2.3.3. Components del sistema.....	32
2.3.3.1. Subjeccions	32
2.3.3.2. Travessa B-355	33
2.3.3.3. Tractament en terraplens i desmunts	34
2.3.3.4. Tractament en viaductes	37
2.3.3.5. Tractament en túnels.....	37
2.3.3.6. Manteniment.....	38
2.3.4. Avantatges del sistema RHEDA 2000	38
2.3.5. Desavantatges del sistema RHEDA 2000	40
2.3.6. Procés constructiu, tècnica de muntatge	40
2.3.7. Secció Tipus.....	44
2.4. Conclusions CAPÍTOL 2	46
CAPÍTOL 3. ESTUDI DE LA TRANSICIÓ	47
3.1. Transició obra de fàbrica – plataforma natural.....	47
3.1.1. Secció longitudinal de la transició	47
3.1.1.1. Actuacions sobre la infraestructura	50
3.1.1.2. Actuacions sobre la superestructura	50
3.1.2. Túnel de Guadarrama	51

3.1.3. Dimensions de cada zona de la transició.....	52
3.1.4. Procés constructiu de la transició	55
3.2. Funcionament estructural.....	57
3.2.1. Rigidesa de la infraestructura de transició	58
3.2.1.1. Mètode de Winkler.....	59
3.2.1.2. Característiques mecàniques dels materials i condicions de contorn.....	59
3.2.1.3. Rigidesa vertical de cada tram de la infraestructura	61
3.2.2. Rigidesa de la superestructura de la transició	62
3.2.3. Rigidesa del conjunt de via en cada punt de la transició	64
3.2.3.1. Teoria del coeficient de rigidesa del recolzament	64
3.2.3.2. Comparació dades experimentals amb les dades empíriques	65
3.2.3.3. Representació dels diferents nivells elàstics	66
3.3. Conclusions CAPÍTOL 3	67
CAPÍTOL 4. MODELITZACIÓ DE LA TRANSICIÓ	69
4.1. Modelització de la transició	69
4.1.1. Disposició de la càrrega	69
4.1.2. Modelització 1	70
4.1.3. Modelització 2	72
4.1.4. Modelització 3	73
4.1.5. Resultats per altres velocitats	75
4.1.6. Resum dels resultats.....	76
4.1.7. El pendent dels assentaments per 350 km/h	77
4.1.7.1. Ajust matemàtic.....	81
4.1.8. Ajust matemàtic per a altres velocitats.....	83
4.2. Anàlisi dels resultats.....	84
4.2.1. Mètode de Zimmerman	84
4.2.2. Càlculs teòrics.....	86
4.2.3. Comparació de resultats	87
4.3. Modificació de la distància entre travesses	89
4.3.1. Modelització	89
4.3.2. Conclusions de la disminució de la distància entre travesses.....	90
4.4. Conclusions CAPÍTOL 4	90
CAPÍTOL 5. CONCLUSIONS	91
5.1. Conclusions	91
5.2. Recomanacions per a futurs treballs	92
ANNEX I. SECCIONS DE VIA SOBRE BALAST	93
ANNEX II. SECCIONS DE VIA SOBRE PLACA	99
ANNEX III. SECCIONS DE TRAVESSES.....	103
ANNEX IV. RESULTATS OBTINGUTS	107
REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES.....	123

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

1.1. Introducció

Avui en dia la imatge que apareix a la ment quan algú menciona la infraestructura d'una via de tren és la d'un parell de carrils alineats que es recolzen sobre una capa, anomenada balast, d'un gruix considerable formada per material rodant d'uns 5 centímetres de tamany. Des dels inicis del ferrocarril a principis del segle XIX s'ha necessitat una infraestructura que suportés l'elevat pes dels combois ferroviaris, per tal que les travesses no es clavessin sobre el terreny. Fins a l'actualitat la capa de balast era la única forma de reduir les tensions sobre la plataforma.

La velocitat punta del ferrocarril ha anat augmentant des dels seus inicis amb la introducció de noves tecnologies, com l'electrificació de les vies, la substitució de travesses de fusta per altres de formigó, etc. Aquest conjunt de nous avenços ha permès que s'originés el que es coneix com a alta velocitat. Aquest nou mode de transport per ferrocarril té unes necessitats a nivell d'infraestructura molt més restrictives que a velocitats convencionals i això ocasiona que la via en si continuï evolucionant. Per aquest motiu va sorgir la via en placa, hi havia una necessitat de millorar la superfície sobre la qual es recolzen els carrils i travesses. El balast té unes molt bones propietats però el seu desgast i la necessitat de batejar la via fan que les operacions de manteniment siguin molt freqüents.

La via en placa és una evolució que engloba tant la superestructura com la infraestructura de la via ja que el balast i les travesses passen a formar part del mateix conjunt, de forma que treballen monolíticament. Aquesta novetat implica una sèrie de canvis substancials en la forma de concepció de les línies d'alta velocitat ja que les operacions d'execució i manteniment ja no són les mateixes.

El present. Actualment la via en placa està estenent el seu ús a les estacions, en túnels i viaductes. Fins i tot el seu ús ja és majoritari en aquests punts, on degut a les seves necessitats les característiques de la via en placa la fan més idònia.

El futur. El que ens depara el futur ningú ho sap, però la tendència és a generalitzar l'ús de la placa en vies a cel obert on fins avui en dia el balast no té rival. En línies d'alta velocitat és on la via en placa millora la qualitat de la mateixa via i per tant on en un previsible futur s'anirà implementant.

Es pot dir que avui en dia s'està en un període de transició, del pas de via sobre balast a via sobre placa. Les transicions, com totes, són conflictives perquè confronten a tots els nivells dues tecnologies totalment diferents. Per aquest motiu l'objectiu d'aquesta tesina és l'estudi d'aquestes zones de transició.

1.2. Objectius

En la present tesina el punt de partida sobre el qual es vol obtenir resultats per tal de poder comparar ambdós sistemes de via és la superfície del carril i la plataforma sobre la qual es construeix la via. Degut a la diferent rigidesa dels materials empleats els esforços sol·licitants són diferents. Per aquest motiu les zones de transició entre un tipus de via i l'altre passen a ser un punt clau.

L'objectiu de la tesina és analitzar quins són els assentaments que es produeixen en la superfície del carril i les sol·licitacions sobre la plataforma en aquestes zones de transició per tal de poder millorar aquests punts conflictius. Per poder realitzar-ho es modelitzarà una transició mitjançant el programa SAP2000 per tal d'obtenir les sol·licitacions sobre la plataforma al pas d'un comboi convencional per un punt d'aquests.

Es variarà la longitud de la zona de transició per veure els seus efectes així com la velocitat considerada.

A partir de l'anàlisi dels resultats s'extrauran conclusions i partir d'aquí, si s'escau, es farà una proposta per la millora d'aquests punts conflictius.

1.3. Contingut del document

A continuació s'exposa de forma resumida un breu resum de cada capítol.

- *Capítol 2. Estat del coneixement:*

En aquest capítol primerament es defineixen les parts que componen el conjunt de la via, que s'entén com a qualitat geomètrica d'una via i com es calcula la sol·licitació que causa la circulació dels vehicles ferroviaris. Seguidament es presenten per separat la definició i execució de la via convencional sobre balast i la via sobre placa. Finalment, després d'haver fet una comparativa dels dos tipus de via es fa una introducció a les zones de transició.

- *Capítol 3. Estudi de la transició:*

Es descriu com es realitza la transició de via balast a via en placa. A continuació es s'explica quin és el comportament estructural de la via en placa per tal de poder dur a terme l'anàlisi de la transició mitjançant un programa informàtic. Per acabar el realitza la modelització i s'extreuen els resultats.

- *Capítol 4. Modelització de la transició:*

Per poder dur a terme aquest l'estudi es modelitza la zona de transició mitjançant el programa informàtic SAP2000 i s'obtenen els primers resultats. A continuació del càlcul es mostren quins són els resultats obtinguts per a poder verificar-los i finalment es duu un ajust matemàtic per a cada cas.

- *Capítol 5. Conclusions:*

S'extreuen les conclusions de la realització de la tesina i es fan suggeriments per a futurs treballs relacionats amb aquest camp.

CAPÍTOL 2. ESTAT DEL CONEIXEMENT

En aquest capítol s'expliquen els dos tipus de via que existeixen actualment en els principals eixos ferroviaris, per una banda la via sobre balast i per l'altra la via sobre placa.

Per centrar idees primer de tot es defineixen quins són els elements que componen la via. A continuació es comenta que s'entén com a qualitat geomètrica d'una via per tal de poder comparar després els diferents paràmetres característics entre els dos tipus de via i la transició entre aquests.

Després s'exposa per separat la via sobre balast amb les seves principals característiques i el mètode actual de construcció. Seguidament exactament el mateix però amb la via sobre placa.

Finalment per acabar aquest capítol es descriu el procés actual que s'empra per realitzar la transició entre la via sobre balast i la via sobre placa. Ja que és aquest l'eix principal de la present tesina en aquest punt també s'explica el procediment actual d'execució.

2.1. Introducció

En la present tesina el punt de partida sobre el qual es vol obtenir resultats per tal de poder comparar ambdós sistemes de via és la plataforma. Degut a la diferent rigidesa dels materials empleats els esforços sol·licitants sobre la plataforma són diferents en un o altre cas. Per aquest motiu les zones de transició tenen una vital importància ja que de la mateixa manera que les sol·licitacions arriben diferent sobre la plataforma també els efectes sobre els carrils són diferents afectant de manera directa a la qualitat de la via.

2.1.1. Parts d'una via

Segons el professor López Pita [1] la configuració general d'una via es descriu com a un engraellat format pel carril, travessa i subjecció que es recolza en un llit elàstic constituït pel balast i plataforma.

En una via de ferrocarril existeixen dos parts ben diferenciades, la infraestructura i la superestructura. El que es coneix com a infraestructura està format principalment pel balast més la plataforma. Per la seva banda la superestructura està formada pel carril i les travesses.

Com es pot observar en la figura 2.1, la infraestructura té la configuració típica següent per a línies d'alta velocitat. Cal dir que l'espessor de les capes varia en funció de les necessitats de la via i també del país, ja que cada administració ferroviària té unes configuracions diferents adaptades a les seves necessitats.

- *Balast*: és la capa superior de material rodant, d'uns 35 cm d'espessor, que està en contacte directe amb les travesses.
- *Subbalast*: capa composta per una mescla de balast grava i arena situada immediatament sota el balast i sobre la plataforma de la via, amb la funció d'evitar danys a la plataforma per erosió, drenar l'aigua de la pluja i millorar el repartiment de càrregues.
- *Plataforma*: és la base pel camí de rodadura del ferrocarril sobre el qual s'assenta la superestructura.

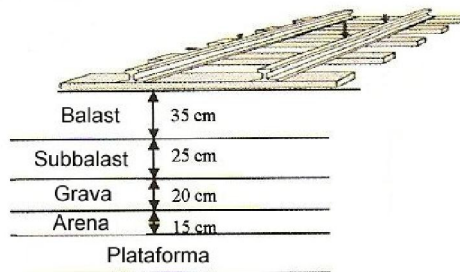


Figura 2.1.1. Configuració típica de la infraestructura, extret de [1].

Per la seva part, la superestructura la formen el conjunt dels següents elements tal com es mostra a la figura 2.2.

- *Carril*: és l'encarregat de suportar directament el pas dels vehicles, té un pes de 60 kg/ml. Les tres parts del carril són el patí, l'ànima i el cap.
- *Subjecció*: n'hi ha de diferents tipologies i és l'element que permet la fixació dels carrils a les travesses. N'hi ha 4 en cada travessa, 2 per cada carril.
- *Placa d'assentament*: és un element elàstic que es situa entre la travessa i el carril per tal de donar una major elasticitat vertical al conjunt de la via (figura 2.3).
- *Travessa*: és l'element vital de suport sobre el qual descansen els carrils, la seva funció és mantenir l'ample de via al llarg de la traça, fixant els rails, així com transmetre els esforços que es produeixen al balast.
- *Sola elàstica*: és també un element elàstic que es col·loca sota les travesses per tal de modificar la rigidesa de la via i donar-li major elasticitat. S'utilitza en viaductes quan és necessari dotar de major elasticitat a la via per disminuir el deteriorament.
- *Encoixinat elàstic*: es col·loca sota el balast per tal de modificar la rigidesa de la via i donar-li major elasticitat. Té un ús similar al de les soles elàstiques.

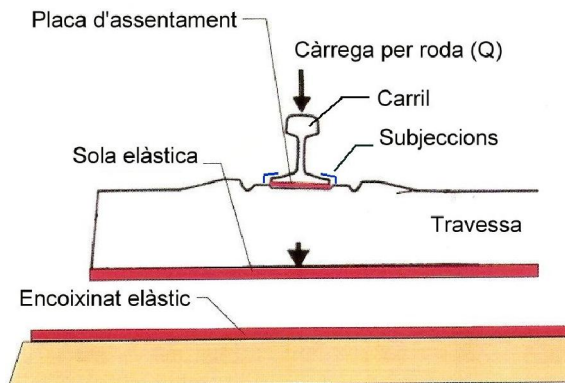


Figura 2.1.2. Configuració típica de la superestructura, extret de [1].



Figura 2.1.3. Placa d'assentament més les subjeccions i carril ja fixat a la travessa, extret de [1].

2.1.2. Qualitat geomètrica d'una via

Quan un vehicle circula al llarg d'una via, disposa de sis graus de llibertat que es corresponen amb els desplaçaments segons els tres eixos: vertical, transversal i horitzontal, així com amb els girs respecte aquests mateixos eixos. Així com els moviments no es coneixen amb cap nom concret, els girs reben els noms de galop (eix horitzontal), balanceig (eix longitudinal) i llaç (eix vertical). En la figura 2.4. es pot observar de forma esquemàtica cada eix amb el corresponent gir.

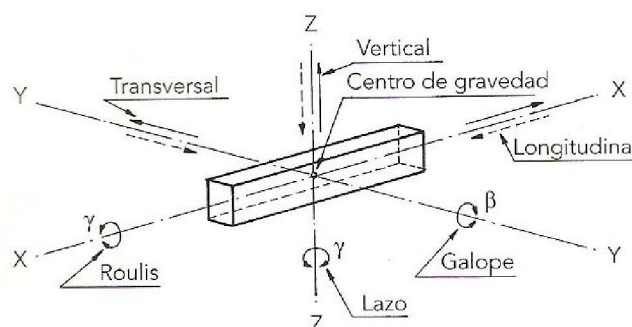


Figura 2.1.4. Esquema dels moviments d'un vehicle ferroviari, extret de [1].

Com a conseqüència d'aquests desplaçaments i girs es produeix sobre la via un conjunt de sol·licitacions on cadascun d'aquests esforços té una incidència pràctica per al dimensionament de la via. Els esforços verticals constitueixen el criteri de base pel disseny dels components de la traça, els esforços transversals permeten determinar la velocitat màxima de circulació dels vehicles, i finalment, els esforços longitudinals poden ocasionar el vintament vertical o bé horitzontal de la via.

En relació a la qualitat de la via, entenent la via com a camí de rodadura, és possible obtenir informació suficient si es quantifica la magnitud de cinc paràmetres que són els

que caracteritzen la qualitat geomètrica d'una via, on cadascun d'ells està relacionat amb un moviment. L'experiència al llarg dels anys en l'explotació de les línies ha donat la garantia de que són aquests els paràmetres que defineixen d'una manera més concisa la qualitat de les vies.

- *Anivellació longitudinal.* és el paràmetre que defineix les variacions de cota de la superfície de rodadura de cada carril respecte a un pla de comparació. Afecta al moviment de galop.
- *Anivellació transversal.* estableix la diferència de cota existent entre les superfícies de rodadura dels fils de carril en una secció normal a l'eix de la via. Afecta al balanceig.
- *Ample de via.* paràmetre que determina la distància existent entre les cares actives dels caps dels carrils, a 14 mm, per sota de la superfície de rodadura. Influeix sobre el moviment transversal, de llaç.
- *Alineació.* per a cada fil de carril representa la distància en planta respecte a l'alineació teòrica. Influeix sobre el moviment transversal, de llaç.
- *Alabeig.* paràmetre que representa la distància existent entre un punt (P) de la via i el pla format per altres tres punts (ABC). Té incidència sobre possibles descarrilaments.

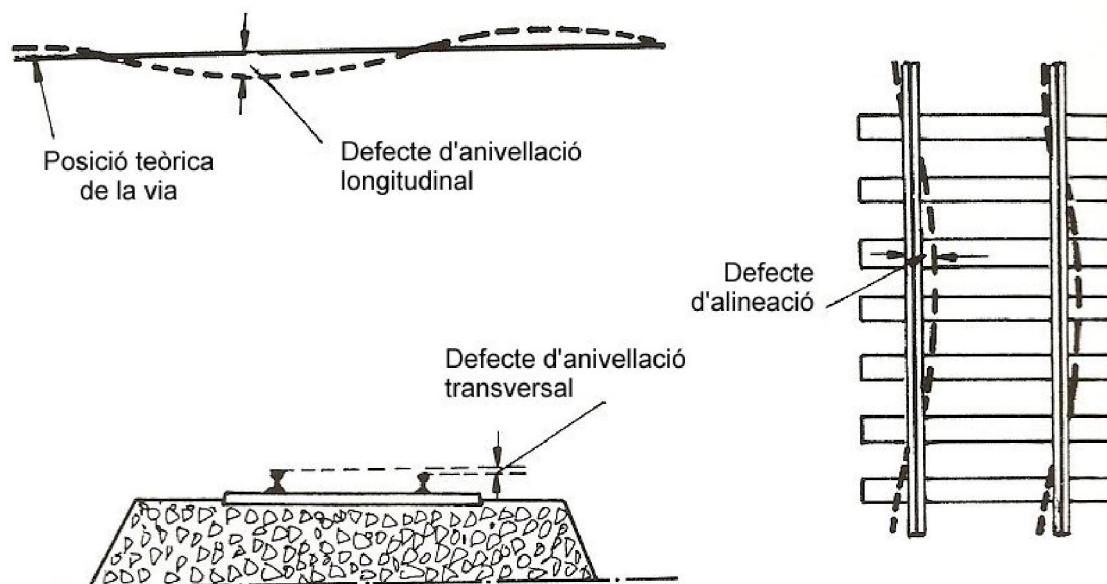


Figura 2.1.5. Defectes de anivellació longitudinal, transversal i d'alineació, extret de [1].

Com ja s'ha dit la quantificació d'aquests paràmetres és la que permet analitzar la qualitat d'una via quan es fa referència a temes de comoditat, seguretat i confortabilitat. Per això, tan en condicions de construcció (muntatge) com de conservació cada gestor ferroviari exigeix unes toleràncies màximes relacionades en cadascun d'aquest cinc factors.

La següent taula (2.1.1) mostra la qualitat geomètrica exigida a línies d'alta velocitat d'ADIF. Tanmateix, per a cada paràmetre la qualitat geomètrica ve determinada per la seva desviació típica i pel seu valor màxim en cada interval de 200 metres. Per a cadascun dels paràmetres definits s'estableixen dos nivells de qualitat:

QN 1: valor que implica prestar atenció a la via o una operació correctiva programada.

QN 2: valor que exigeix una operació correctiva a curt plaç.

Paràmetre	Valor màxim 200m (mm)		Desviació típica (mm)	
	QN 1	QN2	QN 1	QN2
Anivellació longitudinal 3-25 m	4	8	1,0	1,3
Alineació 3-25 m	4	6	0,7	1,0
Anivellació longitudinal 25-70 m	6	8	2,0	3,0
Alineació 25-70 m	6	8	1,3	2,0
Anivellació longitudinal 70-120 m	8	10	3,4	4,0
Alineació 70-120 m	8	10		
Alabeig 3 m	6	7	-	-
Peralt	5	10	0,7	1,0
Ample de via	+5/-3	+10/-5	0,7	1,0

Taula 2.1.1. Llíders de la qualitat geomètrica, extret de [2].

De tots aquests paràmetres que s'han esmentat, en l'estudi de la transició entre via en placa i via balast el valor més rellevant és el referit a l'anivellació longitudinal, ja que aquest valor d'assentament és el que s'ha de limitar quan un vehicle passa per un d'aquests punts crítics garantint unes condicions de seguretat i confortabilitat òptimes.

2.1.3. Esforços verticals sobre la via

Vist que els desplaçaments que són més interessants des del punt de vista de la present tesina es produeixen sobre l'eix vertical, en aquest apartat es caracteritza i es quantifica quin és l'esforç sobre aquest eix, que donat el nivell d'explotació actual de les línies és el que produeix el tràfic ferroviari de passatgers.

Els tipus de combois que circulen per les línies d'alta velocitat es caracteritzen per ser la punta de llança en el que a prestacions i tecnologia es refereix quan es parla de trens. En funció de la casa comercial que subministri el tren, les prestacions que ofereixen són molt similars entre si però el que canvia en alguns casos és la tecnologia.

Per a poder determinar una càrrega tipus a efectes d'analitzar la problemàtica en zones de transició, s'ha escollit com a comboi tipus el model de la casa comercial Talgo 350 EMU. Aquest tren de la firma basca, conegut popularment amb el nom de "pato", conjuga les màximes prestacions amb la famosa tecnologia Talgo pendular. A més a més es tracta d'un comboi que a nivell nacional està sent utilitzat actualment per Renfe en la línia que uneix Madrid i Barcelona.



Figura 2.1.6. Vista del Talgo 350 EMU, extret de [3].

Les principals característiques tècniques d'aquest model són les que es mostren en la taula 2.2. Respecte el seu predecessor, el Talgo 250 EMU, ofereix les millors principals en els següents aspectes: òptim disseny aerodinàmic, elevada redundància dels equips de tracció i auxiliars, paliers monoeix entre caixes, paliers amb rodes independents i sistema de guiatge d'angle zero, caixes dels cotxes articulats recolzades en tres punts, lleugeresa de pes, pendulació natural i butaques giratòries.

Característica	Valor	Característica	Valor
Potència instal·lada	4000 kW	Ample de via	1435 mm
Bogi	Bo - Bo	Tracció	Elèctrica
Empate	2.65 metres	Tractores motrius	2
Longitud tractora	20 metres	Cotxes de passatgers	12
Amplada màxima	2.96 metres	Eixos tractors	8
Altura	4 metres	Màxim d'eixos del tren	21
Velocitat comercial màxima	330 km/h	Pes màxim per eix	17 tm
Acc. lateral màxima en corba	1.2 m/s ²	Longitud màxima del tren	200 m

Taula 2.1.2. Característiques del Talgo 350 EMU, extret de [3]

Des dels inicis del ferrocarril es va tenir constància que la velocitat de circulació generava sobre la via uns esforços verticals superiors a les càrregues estàtiques de cada eix. A partir de les campanyes experimentals les formulacions que es van establir per obtenir la càrrega vertical seguien la següent forma:

$$Q_d = Q_E \cdot f(V) \quad (2.1)$$

On Q_d és la càrrega dinàmica per cada roda, Q_E la càrrega estàtica i $f(V)$ un factor de majorització que depèn exclusivament de la velocitat.

El professor Eisenmann et al. (1969), a partir dels resultats obtinguts en campanyes d'assaig dels ferrocarrils alemanys, va obtenir que la distribució d'esforços verticals, per una velocitat donada, seguia una llei del tipus normal permetent establir així la relació matemàtica. En aquests assaigs era possible mesurar les càrregues i descàrregues a que es veia sotmesa la roda en comparació al valor de la càrrega estàtica.

La fórmula 2.2 és la desenvolupada pel professor Eisenmann, segons aquesta fórmula el factor de majorització de la càrrega depèn de la velocitat, la qualitat de la via i un factor estadístic que engloba l'amplitud de l'interval d'excitacions.

$$Q_d = Q_E \cdot [1 + t \cdot \beta \cdot \varphi] \quad (2.2)$$

- t = factor de seguretat estadística

$t = 1$	68,3% dels valors mesurats
$t = 2$	95,5% dels valors mesurats
$t = 3$	99,7% dels valors mesurats
- β = factor que depèn de la qualitat de la via

$\beta = 0,1$	vies en molt bon estat
$\beta = 0,2$	vies en bon estat
$\beta = 0,3$	vies en mal estat
- φ = factor dependent de la velocitat

$$\varphi = 1 + \frac{V - 60}{140} \quad \text{on } V \text{ en Km/h}$$

La fórmula d'Eisenmann era apta fins a velocitats de 200 km/h. Degut a l'augment de la velocitat d'explotació de les línies fins als 300 km/h es va haver de realitzar un ajust de l'expressió matemàtica dels anys 60. Llavors, la nova fórmula del professor Eisenmann és la següent:

$$Q_d = Q_E \cdot [1 + t \cdot \beta \cdot \varphi], \text{ on } \varphi = 1 + \frac{V - 60}{380} \quad (2.3)$$

Cal comentar també que el francès Prud'Homme també va obtenir una expressió matemàtica pel càlcul de la sol·licitació vertical dinàmica sobre el carril. La seva fórmula dóna uns valors molt semblants als que s'obtenen mitjançant l'expressió d'Eisenmann. Les conseqüències pràctiques de la seva fórmula invitaven a prestar especial atenció en els següents punts:

- Reduir el nivell del defectes admissibles als carrils.
- Disminuir el pes no suspès dels vehicles.
- Disposar de vies amb la menor rigidesa vertical possible.

Aquesta sobrecàrrega que es produeix amb la velocitat és deguda a les irregularitats que presenten les rodes dels vehicles i els carrils, per una banda, i per l'altra degut al pes no suspès dels vehicles i al pes suspès dels mateixos. Atès que cada material té la una freqüència de vibració pròpia, en funció d'aquesta i del seu pes es produeix la sobrecàrrega dinàmica.

Queda vista doncs la importància de la qualitat geomètrica de la via i la influència de la rigidesa del conjunt de la infraestructura en els esforços sobre la plataforma. Arribats en aquest punt ja es pot determinar la càrrega dinàmica estàndard a la qual es fa referència en l'anàlisi de les zones de transició entre via en placa i balast.

2.1.3.1. Càlcul de la càrrega vertical dinàmica per roda

Per tal de realitzar l'estudi es suposa l'interval de velocitats comprès entre els 200 i els 350 km/h, donat que aquest és el rang de velocitats comercials que ofereix l'alta velocitat.

La càrrega estàtica tipus ve donada pel comboi Talgo 350 EMU, on el seu pes màxim és de 17t per cada eix. Per tant, el pes estàtic per roda és de 8,5t.

A partir de la nova fórmula d'Eisenmann (2.3) es pot calcular la càrrega dinàmica per roda que correspon a cada velocitat considerant els següents valors per als paràmetres "t" i "s", factor estadístic i estat de la via respectivament:

$t = 3$, ja que es correspon al 99,7% dels valors mesurats

$s = 0,1$ es considera que la via d'alta velocitat està en molt bon estat

La taula 2.1.3 mostra la sol·licitació que realment es produeix per a cada velocitat en l'interval comprès entre els 200 i 350 km/h.

V (Km/h)	Q_E (t)	f(V)				Q_D (t)
		t	s	ϕ	$[1 + s\phi]$	
200	8,5	3	0,1	1,368	1,41	11,99
250	8,5	3	0,1	1,500	1,45	12,33
300	8,5	3	0,1	1,632	1,49	12,67
350	8,5	3	0,1	1,763	1,53	13,01

Taula 2.1.3. Càrregues dinàmiques per a cada velocitat, elaboració pròpia.

Com es pot observar, per a una velocitat de 200km/h l'augment de la càrrega és de l'ordre del 41%, per als 300 km/h és del 45% i per als 350 km/h del 53% respecte a la càrrega estàtica.

2.1.3.2. Àrea d'influència d'una càrrega

Donat que les travesses estan separades una distància de 60 cm, l'acció d'una roda es pot assimilar a la d'una càrrega puntual, la seva distribució al llarg de la via té una configuració aproximada com la de la figura 2.7, on la travessa situada immediatament sota la càrrega suporta aproximadament el 40% de l'esforç vertical total. En total són cinc les travesses que reben directament l'acció de la roda, un 23% de la càrrega ho rep les travesses contigües a la central i les més allunyades un 7% cadascuna.

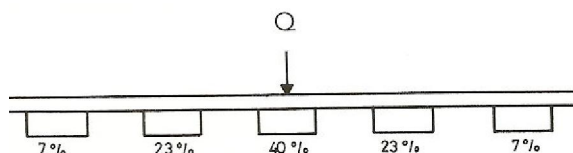


Figura 2.1.7. Distribució d'una càrrega vertical sobre les travesses, extret de [1].

A partir de la figura 2.7 es pot determinar quin és el valor de la sol·licitació que repercuteix sobre cada travessa en un radi de 1,20 metres, és a dir, a dues travesses de distància des de l'origen de la càrrega.

En la taula 2.4 s'aplica la distribució de la figura 2.7 per a la càrrega estàtica de 8,5 t i les corresponents dinàmiques per a cada velocitat des dels 200 als 350 km/h en intervals de 50 km/h. Es considera l'origen de coordenades en el punt d'aplicació de la càrrega i cada travessa a una distància de 60 centímetres, per tant, els punts $\pm 1,20$ metres corresponen a les travesses dels extrems, els punts $\pm 0,60$ metres a les contigües i la posició 0 a la travessa central.

Velocitat (Km/h)	Càrrega Q(t)	Càrrega (t) en funció de la posició de la travessa				
		-1,20 (m)	-0,60 (m)	0 (m)	0,60 (m)	1,20 (m)
0	8,5	0,595	1,955	3,4	1,955	0,595
200	11,99	0,8393	2,7577	4,796	2,7577	0,8393
250	12,33	0,8631	2,8359	4,932	2,8359	0,8631
300	12,67	0,8869	2,9141	5,068	2,9141	0,8869
350	13,01	0,9107	2,9923	5,204	2,9923	0,9107

Taula 2.1.4. Sol·licitacions estàtiques i dinàmiques sobre les travesses afectades, elaboració pròpia.

Les conclusions que es poden extreure de la taula 2.4 és que la càrrega màxima que haurà de suportar una travessa, independentment del tipus de via, és de 5,2 t per a velocitats de 350km/h. Així mateix per a la velocitat més baixa, de 200 km/h, la mínima sol·licitació és de 0,84 t per a les travesses menys sol·licitades.

A més a més s'ha de tenir en compte que els eixos dels vehicles estan agrupats en bogis, en el cas del Talgo 350 són del tipus Bo-Bo, per tant es tracta de bogis amb 2 eixos cadascun. Donat que la distància entre eixos, l'*empate*, és de 2,65 metres, i que les travesses estan separades una distància de 60 centímetres, llavors es pot assegurar que les càrregues verticals dels eixos d'un bogi no es superposen entre elles. Aquest fet permet que alhora de realitzar l'anàlisi es pugui considerar només la influència d'un eix del vehicle per a l'estudi de les sol·licitacions.

2.2. Via sobre balast

Des dels primers temps del ferrocarril es va comprovar que les càrregues de tràfic transmeses a les travesses produïen l'enfonsament d'aquestes sobre la plataforma al pas dels vehicles. D'aquesta manera, amb la introducció d'una capa granulomètrica d'un gruix determinat, es repartien millor les càrregues sobre la plataforma al ser major la superfície de transmissió i es corregia la problemàtica.

2.2.1. El balast

Com a element estructural el balast està format per un conjunt de partícules granulars de diferent tamany i forma. De per si mateix, segons Estradé i López Pita [4], constitueix la part més dèbil de la via per la seva fàcil degeneració, produïda per les sol·licitacions dinàmiques i climàtiques a que es veu sotmès.

El balast és doncs una capa de material granular que es col·loca sota les travesses i per tant desenvolupa una important funció tan quan es refereix a les accions verticals i transversals, que exerceix el pas d'un comboi ferroviari, com quan es refereix a les accions climàtiques.

Les partícules que el conformen tenen un tamany comprès entre els 20 i 60 mm, segons l'àbac granulomètric de la normativa europea. A més a més, s'intenta evitar al màxim la presència de partícules cantelloses, tan per la dificultat en l'operació de bateig com per la seva tendència al lliscament. Per a poder suportar l'acció del bateig es necessita una roca suficientment dura per a que no es trenqui. Aquest requeriment es compleix si la roca origen té una resistència a compressió simple major de 1200 kg/cm² segons la norma del ferrocarril espanyol de l'any 2000.

Quan un vehicle es desplaça per la via es produeixen simultàniament els fenòmens de deflexió vertical i aixecament de la via que s'exposen a continuació:

- *Deflexió vertical*: afecta una longitud de via de 3 a 4 metres aproximadament, el seu valor màxim sota el punt d'aplicació de la càrrega oscil·la entre 1,5 i 2 mm per a una càrrega de 10 tm per roda.
- *Ona d'aixecament*: és l'aixecament de la part davantera de la via en la direcció del moviment, la magnitud és de l'ordre de 1/10 de la deflexió vertical (de l'ordre de 0,15 a 0,20 mm).

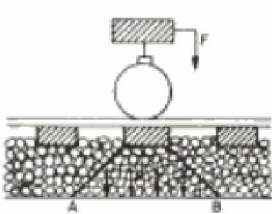

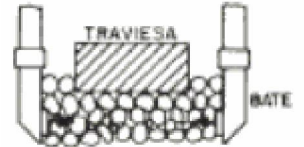


El successiu golpeig de les travesses sobre el balast pel pas de cada eix, un tren de mercaderies pot arribar als 150, sumat a l'ús cada vegada més de travesses més pesades (de 300 a 380 kg) pot ocasionar un ràpid deteriorament de les partícules de balast. Per minimitzar aquest deteriorament s'exigeix que les partícules tinguin un coeficient de Los Angeles¹ (CLA) menor de 15 per a línies d'alta velocitat segons la normativa espanyola.

¹ Coeficient de Los Angeles (CLA): coeficient que estableix la resistència al desgast d'un àrid, ja sigui natural o de maxaqueig: s'estableix a partir de la diferència de pes entre la mostra inicial i el pes del material retingut per un determinat tamis (1,68 mm) després d'haver sotmès aquesta mostra a un procés abrasiu per mitjà de boles de ferro, de pes i número determinats. Extret de [5].

Així doncs, les funcions principals del balast enfront els esforços verticals són les següents:

- Contribuir a proporcionar estabilitat i amortiment a la via per tal de reduir la magnitud de les sol·licitacions dinàmiques que exerceixen el pas dels vehicles.
- Disminuir el nivell de pressions que arriben a la superfície de la plataforma sobre la qual discorre la via per evitar, com ja s'ha comentat, que s'arribi a superar la capacitat resistent del terreny.
- Suportar l'abradió que les partícules poden tenir com a conseqüència del seu contacte amb infraestructures rígides com per exemple ponts de formigó.

En resum la figura 1 és un esquema per deduir les funcions que s'han d'exigir als materials utilitzats com a balast, incloent també les variables de resistència, tamany o forma que permeten verificar el major o menor compliment de les funcions esmentades.

Element que desencadena la funció	Esquema d'actuació	Funció del balast	Factor commensurable
Accions verticals		Proporcionar elasticitat i amortiment	Espessor de balast
		Resistència a l'abradió	Coeficient de Deval
		Disminució de les pressions sobre la plataforma	Espessor de balast
		Dimensions de duresa	Tamany granulometria Resistència a compressió de la roca
		Resistència al xoc	Coeficient de Los Angeles
Accions horitzontals		Dimensions de compactació	Tamany granulometria
Accions climàtiques		Filtració, resistència al gel	Granulometria Resistència als sulfats

Taula 2.2.1. Esquema per a les funcions i característiques del balast, extret de [1].

Per poder complir les dues primeres funcions esmentades és necessari un gruix mínim de la capa de balast d'uns 25 centímetres i un màxim de 35. El llindar inferior ve determinat per la consecució dels objectius, amb menys gruix no es poden donar aquestes funcions, i el llindar superior ve establert per la necessitat de limitar els assentaments de la via i els defectes geomètrics.

En el cas de l'abrasió s'aconsegueix l'objectiu exigint al balast un valor major de 15 en el coeficient Deval².

L'operació de manteniment més freqüent en el balast és el bateig mecanitzat, es tracta de corregir l'anivellació de la via mitjançant la compactació energètica del balast de sota les travesses proporcionant-los-hi una base sòlida. Si la consolidació és adequada llavors la pedra ocupa el menor volum possible, això permet augmentar el drenatge de la plataforma de la via.

2.2.2. Les travesses

Les travesses són l'element de la superestructura que té com a objectiu fixar i mantenir la posició del carril. Paral·lelament els elements que permeten que es dugui a terme aquesta interacció entre carril i travessa són les subjeccions. D'aquests elements n'hi ha de diferents ja que cada administració utilitza el tipus que creu més convenient. Independentment del model que siguin, subjecten cada carril a la travessa per dos punts. Les subjeccions són elàstiques i treballen de manera que fixen el peu del carril sobre la travessa ja preparada per albergar aquests dispositius.

En els orígens del ferrocarril al s. XIX el material empleat per les travesses era la fusta ja que les seves propietats físiques i mecàniques, sumat a l'abundància d'aquest recurs, en recomanaven la instal·lació. L'ús del formigó com a material per a la construcció de travesses va deixar en un segon terme les de fusta, ja que el formigó proporciona una vida útil molt més elevada, de l'ordre de dos o tres vegades respecte la fusta. A més a més manté unes condicions físiques constants durant el seu servei i degut al seu major pes proporciona una major resistència lateral de la via enfront els esforços transversals. No obstant el seu pes de 180 a 350 kg, enfront els 80 kg de les travesses de fusta, dificulta el seu maneig.

Hi ha dos tipus diferents de travesses de formigó, les monobloc i les bibloc (travessa RS). Les monobloc tenen una forma anàloga a les travesses de fusta però fabricades amb formigó pre o postensat. Per la seva part les de tipus RS estan formades per dos daus de formigó units per una riostra.

Les variables més significatives d'una travessa són les següents:

- *Dimensions*, ja que l'àrea de recolzament disponible és un factor per reduir les pressions que es transmeten a la capa de balast.
- *Pes*, contribueix a donar una major estabilitat longitudinal i transversal a la via.

² Coeficient Deval: ve determinat pel valor obtingut que s'obté en l'assaig Deval, que consisteix en introduir 44 pedres de 7 cm que pesen 5 kg, dins un cilindre que gira sobre un eix horitzontal, però muntat de tal manera que aquest estigui inclinat. Es fa girar el cilindre durant 5 hores de manera que doni 10000 voltes. Llavors es pesen el conjunt de materials disgregats obtenint "P" en grams. El coeficient Deval ve donat per la relació 400/P. Extret de [6].

- Travessa AI-04

La travessa de la figura 2.2.1 és la utilitzada per ADIF en la actualitat pels principals corredors d'alta velocitat que estan en execució o bé recentment posats en servei. Es correspon al model AI-04 EA (UIC-60), es tracta d'una travessa de tipus monobloc, de formigó pretensat i per a vies d'ample internacional (1435 mm) que utilitzin el carril tipus UIC 60 (60 kg/ml).

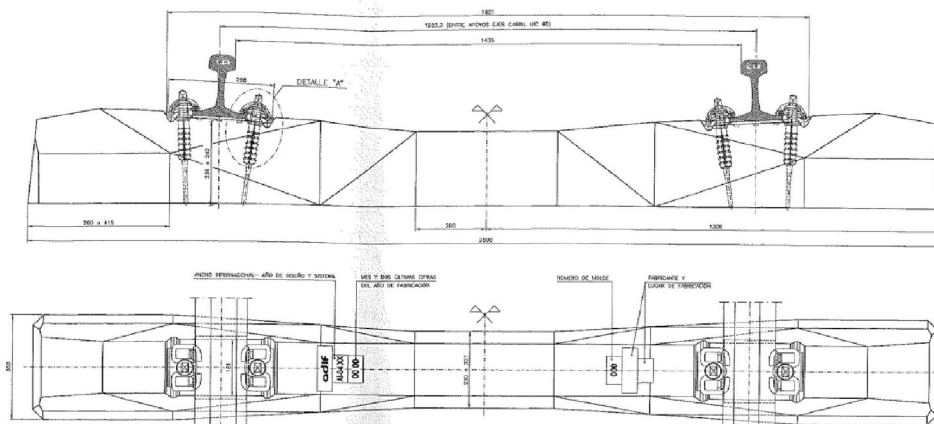


Figura 2.2.1. Alçat i planta de la travessa AI-04, extret de [7].

Travessa	Pes	Àrea	Longitud	Amplada a l'extrem	Amplada al centre
AI-04	315 kg	6500 cm ²	2600 mm	300 mm	227 mm

Taula 2.2.2. Característiques de la travessa AI-04. Extret de [7].

2.2.3. Subjeccions

Les subjeccions són un sistema que garantitza un comportament elàstic enfront els moviments verticals. La seva principal funció és la d'aportar un contacte permanent, sense folgança, entre el carril i la travessa, mantenint l'ample de via dins uns toleràncies i proporcionar l'aïllament elèctric adequat entre els carrils.

Les parts principals de les subjeccions són les següents:

- *Placa d'assentament:* és l'element de recolzament. La seva funció és la d'atenuar el impactes, per això és l'element elàstic per antonomàsia. En general té una rigidesa que oscil·la entre 30 i 100 KN/mm.
- *Placa acodada:* és l'element topant. Té com a missió suportar les càrregues laterals.
- *Cargol i beina:* són els elements d'ancoratge. Transmeten l'esforç d'apretat del carril a la travessa a la vegada que aïllen elèctricament ambdós fils de carril de la via.
- *Clip elàstic:* és l'element que actua com a molla. Té un recorregut elàstic directament associat a la placa d'assentament.

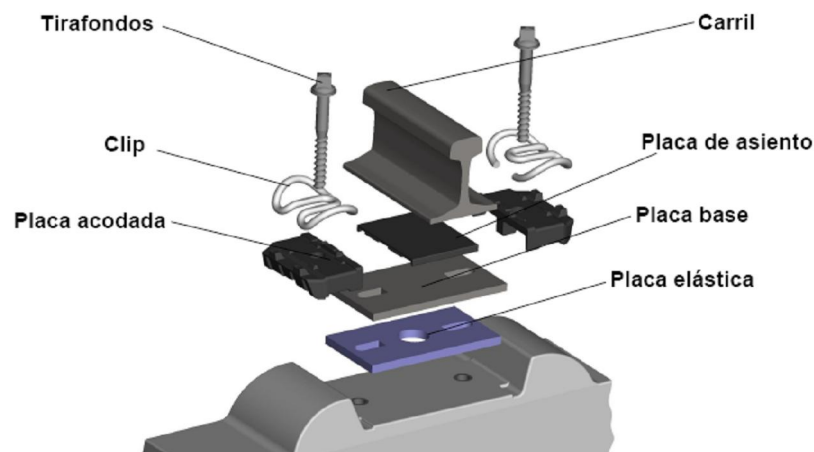


Figura 2.2.2. Elements que componen una subjecció. Extret de [9].

2.2.4. Avantatges de la via sobre balast

A continuació s'enumeren alguns dels principals avantatges que ofereix la tecnologia de via sobre balast.

- Sense condicionants en obres de terra degut als assentaments del terreny.
- Menor inversió en infraestructura.
- Possibilitat de correcció de la qualitat geomètrica.
- Es pot utilitzar maquinària convencional en algunes operacions.
- En cas de descarrilament les reparacions puntuals només comprometen els elements implicats.
- Hi ha menor transferència de vibracions cap als voltants de la via.
- El balast ajuda a reduir la contaminació acústica que es produeix al pas dels vehicles.

2.2.5. Desavantatges de la via sobre balast

En el següent apartat es descriuen alguns dels desavantatges més característics degut a la implementació de la via sobre balast enlloc d'utilitzar un altre tipus de via.

- Major cost de la superestructura.
- Major cost de manteniment.
- El balast es renova completament cada 30 anys. Per la seva part, les subjeccions i carrils cada 35 anys.
- Per a velocitats superiors als 320 – 330 km/h es produeix el fenomen anomenat “volada del balast”, que consisteix en la succió del d'aquest a causa del flux d'aire que genera el pas del tren. En la següent figura es mostra aquest fenomen.



Figura 2.2.3. a) Escenificació de la volada del balast. b) Exemples d'aquest fenomen. Extret de [10].

2.2.6. Procés constructiu, tècniques de muntatge

A continuació es descriu quin és el procés de muntatge per a vies sobre balast. La tècnica que s'utilitza ha canviat darrerament. Abans es muntava la via mitjançant una via auxiliar provisional però avui en dia ja no s'utilitza. Per aquest motiu primer de tot es descriuen quines són les diferències entre les tècniques de muntatge i després tot el procés de construcció, des de que està la plataforma finalitzada fins que ja poden circular els vehicles d'alta velocitat.

2.2.6.1. Diferències entre muntatge amb via auxiliar i sense aquesta

Abans de començar el muntatge de la via pròpiament dit és necessari establir el que es denomina com a bases de muntatge. Es tracta de punts estratègics on s'hi emmagatzemen els materials per poder complir amb el ritme d'execució adequat i així optar a un major aprofitament dels recursos de que es disposa. Aquestes instal·lacions, encara que es conceben inicialment per a la construcció, a la llarga es converteixen en els centres des d'on es realitza el manteniment de les línies. En una xarxa ferroviària com la espanyola, on coexisteixen dos amplituds diferents, en la qual el transport d'elements de grans dimensions longitudinals com carrils i desviaments es realitza per la línia convencional, les bases de muntatge han de constituir el punt d'accés. Per aquest motiu es requereix que on es localitzin sigui un punt on les dues xarxes conflueixin o estiguin molt properes. En general les operacions de muntatge s'efectuen en trams independents de entre 50 i 100 quilòmetres de longitud, i per tant, és l'àrea d'actuació que tenen.

Les bases de muntatge estan dotades de zones d'emmagatzematge dels materials de via i amb els mitjans necessaris per a la seva descàrrega i manipulació. Aquestes zones són fonamentals per tal d'independitzar el ritme de treball del de subministres. L'experiència demostra que la disponibilitat d'aquestes zones millora el plaç d'execució de les obres i a més a més millora la qualitat de les mateixes.

El conjunt d'instal·lacions que han d'estar inclosos en una base de muntatge són els següents:

- Naus de manteniment i reparació de maquinaria.
- Zones per a realitzar canvis d'eixos.
- Vies d'estacionament
- Dipòsits d'aigua i combustible
- Zones de premuntatge dels desviaments.



Figura 2.2.4. Vista aèria d'una base de muntatge. Extret de [9].

La diferència a la qual es fa referència es tracta en el procediment per tal de situar els carrils sobre la traça.

En la base de muntatge és on els carrils estan apilats en barres lineals de 270 metres de longitud. Des d'aquestes zones s'han de repartir al llarg de la traça i instal·lar-los sobre les travesses. Per dur a terme aquesta operació el procediment amb via auxiliar consistia en situar una via de segona mà (figura 2.2.5.a), de travesses de fusta i carril de 45 kg/ml, al llarg de la traça i damunt la capa de balast prèviament escampada. Per aquesta via auxiliar circulava el tren carriler que duia els carrils i es descarregaven al costat tal com es mostra a la figura 2.2.5.b. Posteriorment es dipositaven les travesses i es col·locava el carril sobre aquestes.

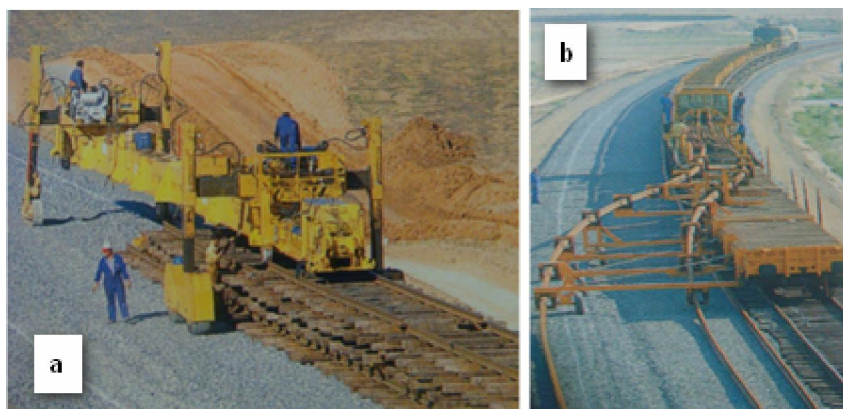


Figura 2.2.5. a) Muntatge de la via auxiliar. b) Descàrrega del carril sobre el balast, extret de [9].

La introducció de la via d'alta velocitat plantejava varis inconvenients com la selecció, transport i el muntatge d'aquesta via auxiliar. La necessitat de reduir els plaços d'execució i a la vegada garantir la qualitat exigida per aquest tipus de via, van contribuir a desenvolupar un procediment innovador que ha suposat un canvi radical

en la concepció del procés de descàrrega de carrils en els muntatges de via d'alta velocitat.

El nou procediment de descàrrega es basa en la via directora, és a dir, per la mateixa via que s'ha construït avança el tren carriler i mitjançant un sistema d'arrossegament dels carrils per corrons, aquests es disposen sobre les travesses prèviament dipositades i finalment ja es pot procedir al clavat provisional.

Amb el muntatge de la via directora s'aconsegueixen dos objectius, per una banda l'avanç del muntatge sense necessitat de via auxiliar i per l'altra el muntatge a continuació, de la via paral·lela utilitzant plataformes de descàrrega lateral unides a la cua del tren carriler.

Així doncs a continuació es mostren els principals avenços que suposa l'ús de la via directora:

- Eliminació de la via auxiliar, es redueix el cost i s'elimina la fase de muntatge d'aquesta.
- Posicionament de les travesses sobre el llit de balast independitzant aquesta operació d'altres fases de muntatge.
- Possibilitat d'iniciar el muntatge immediatament després de l'estesa del balast.
- Millora el rendiment del muntatge en un 60% respecte al procediment tradicional de via auxiliar.



Figura 2.2.6. Descàrrega del carril des del tren carriler, amb via directora. Extret de [9].

2.2.6.2. Procés constructiu

El procés de muntatge d'una via sobre balast consta dels següents nou passos que es resumeixen a continuació.

1 - Topografia

- Implantació de la xarxa secundària de fites de centrat forçós a un costat de la traça (figura 2.2.7.a).
- Col·locació de piquets i punts singulars.
- Presa de dades la plataforma per a la comprovació i ancoratge de la rasant.

2 - Repartiment de travesses

- Aquesta tasca l'acostuma a realitzar ADIF, el repartiment es realitza en els dos marges de la plataforma (figura 2.2.7.b).
- Per a no produir cap dany sobre les travesses aquestes es recolzen sobre dorments de fusta de tal forma que no molestin durant l'estesa del balast i a la vegada sigui fàcil aixecar-les per a la seva posterior col·locació.



Figura 2.2.7. a) Col·locació d'una fita de centrat forçós. b) Travesses situades al marge de la plataforma. Extret de [9].

3 - Estesa del balast

- Per mitjà de camions es realitza el subministrament sobre la traça des del punt d'emmagatzematge de les bases de muntatge.
- D'una sola passada i en tota la seva amplada mitjançant una estenedora de balast es forma una capa de 10 centímetres de gruix sobre la plataforma de subbalast. L'espessor d'aquesta capa conforma el 33% del total de la banqueta (figura 2.2.8.a).
- A través d'un cable guia fixat al marge de la plataforma es controla en planta i alçat a l'estenedora.
- Per evitar danys sobre les travesses es rebaixa el balast en la zona central corresponent a l'eix de cada via.

4 - Posicionament de les travesses

- Tant en via directora com en paral·lela el posicionament de les travesses es realitza una vegada estesa la capa de balast.
- Mitjançant una retroexcavadora equipada amb un útil de descàrrega (figura 2.2.8.b) es realitza la col·locació de les travesses en la seva posició definitiva sobre el llit de balast. Aquest pas és molt important per garantir un bon muntatge de la via, ja que aquesta depèn totalment d'una bona alineació i distribució de les travesses.

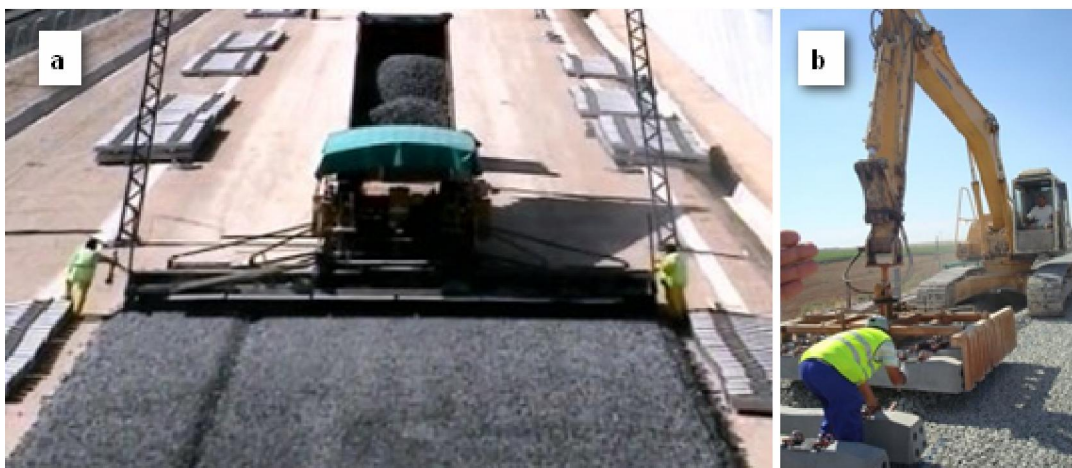


Figura 2.2.8. a) Estesa del balast en tota l'amplada de la traça. b) Posicionament de les travesses mitjançant retroexcavadora, extret de [9].

5 - Muntatge de via en esquelet

En aquest pas hi ha dos variants en funció del tipus de muntatge que es realitzi, les principals diferències ja s'han comentat en l'apartat anterior. Aquí s'explica el muntatge en via directora sense necessitat de la via auxiliar.

Primer de tot es construeix la via directora i a continuació la via paral·lela a la primera. El rendiment habitual en el muntatge de la via directora es de 1890 metres (14 barres) al dia i 3240 metres (24 barres) en via la paral·lela.

- Des de la llosa de descàrrega de la base de muntatge es descarrega el carril, el qual es troba emmagatzemat en barres de 270 metres.
- En el que serà la via directora es descarreguen els carrils sobre corròns amb l'ajuda d'una grua sobre orugues. Aquest pas sense via auxiliar requereix els següents passos:
 - § Col·locació de corròns sobre les travesses, es situen cada 25 travesses (15 metres) en la posició on caurà el carril. Són imprescindibles ja que guien el carril durant la descàrrega i eviten l'erosió que suposaria el seu lliscament directe sobre les travesses (figura 2.2.9.a).
 - § Descàrrega del carril sobre corròns amb la grua (figura 2.2.9.b).
 - § Aixecament i trasllat dels corròns cap al següent avanç.
- El cicle es finalitza amb l'aixecament i trasllat dels corròns cap al següent avanç.
- Sota cap concepte es pot foradar l'ànima del carril, per tant, per donar continuïtat a la descàrrega de barres s'uneixen entre elles mitjançant brides (figura 2.2.10.a) que abracen el carril tan longitudinalment com lateralment.

El muntatge de la via paral·lela s'inicia amb un desfassament de 48 hores respecte a la directa (figura 2.2.10.b).

- S'acoblen a la cua del tren carriler tres plataformes del tipus MMQ, amb un dispositiu guiat i separadors per facilitar la descàrrega lateral.
- Amb l'ús dels corròns sobre les travesses es dipositen els carrils sobre aquestes.

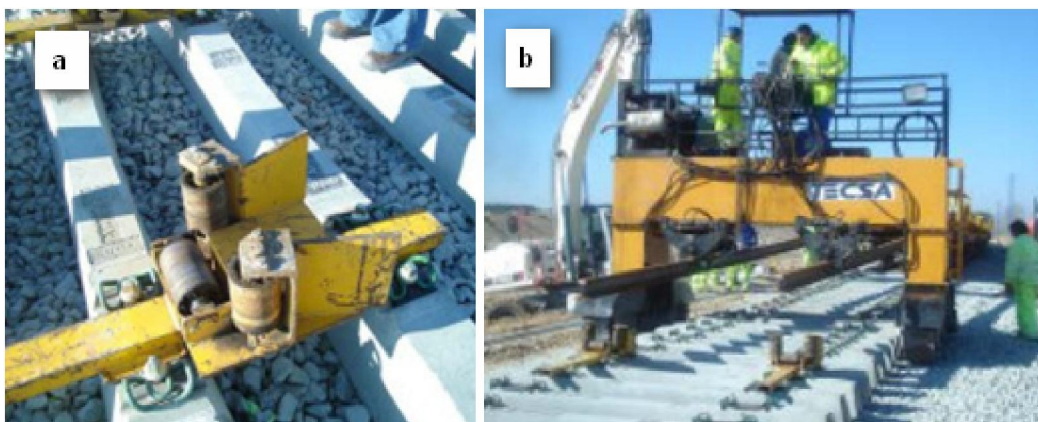


Figura 2.2.9. a) Corrons per al lliscament dels carrils sobre les travesses. b) Descàrrega dels carrils amb grua des del tren carriler, extret de [9].



Figura 2.2.10. a) Brides per donar continuïtat als carrils. b) Procediment de muntatge de la via paral·lela amb un desfasament de 48 hores respecte a la directora, extret de [9].

6 - Apretat provisional

En les dues vies una vegada s'han retirat els corrns es procedeix a la subjecció del carril.

- Mitjançant una motoclavadora hidràulica (figura 2.2.11.a) es realitza un parell d'apretament provisional d'uns 120 – 150 Nm. Posteriorment una vegada alliberades les tensions el parell arriba fins als 220 Nm.
- Seguidament es comprova la posició de les travesses i l'ample de via.

7 - Soldadura aluminotèrmica

Aquest tipus de soldadura consisteix en abocar sobre un motlle que rodeja els extrems dels carrils a soldar, un metall fos obtingut per reacció aluminotèrmica. Per procedir a una soldadura d'aquest tipus, en primer lloc es prepara un motlle d'arena que reproduïx la forma exterior del carril en dos meitats. A continuació es regula l'interval a unir entre els dos carrils i es netegen els seus extrems.

Es disposa d'un crisol³ (figura 2.2.11.b) amb la mescla aluminotèrmica, una vegada finalitzada la reacció el metall líquid omple el motlle. Finalment es desemmotlla la junta i es procedeix a les operacions d'acabat.

Els carrils es col·loquen amb les juntes centrades entre dos travesses per tal de permetre la soldadura sense haver de moure les travesses.

- La soldadura aluminotèrmica consisteix en vessar sobre un motlle, que rodeja els extrems dels carrils a soldar, un metall fos obtingut per reacció aluminotèrmica que és fortament exotèrmica.
- Aquest tipus de soldadura té una cala de $23 \pm 2\text{mm}$ i com a màxim es poden realitzar 3 soldadures seguides, de forma que la barra per alliberar sigui de 1080 metres (4 barres de 270 metres).

³ Crisol: es una cavitat dels forns que reb el metall fos. El Crisol normalment està fet de grafit amb un cert contingut d'argila i que pot soportar elements a altes temperatures, superiors a 1500°C. Extret de [13].

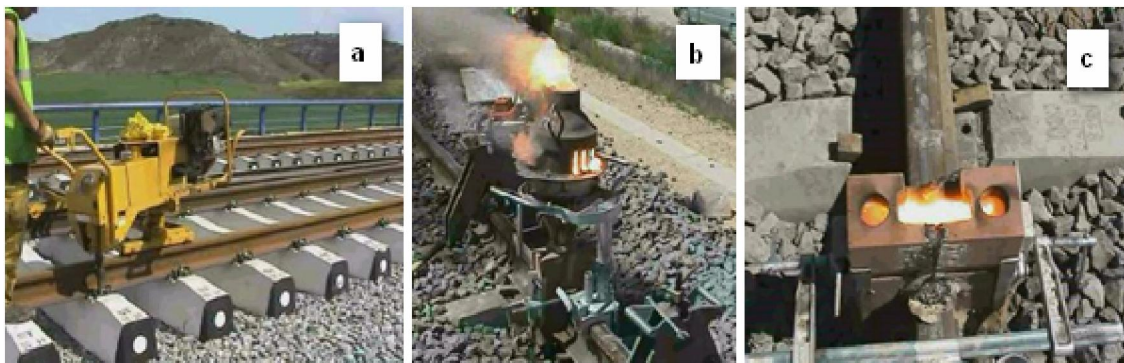


Figura 2.2.11. a) Motoclavadora hidràulica per realitzar l'apretat de les subjeccions. b) Crisol de la soldadura aluminotèrmica. c) Motlle de la soldadura, extret de [9].

8 - Aixecaments de via

L'estesa primera de balast que es realitza només arriba fins als 10 centímetres de gruix, per arribar als 35 sota travessa que com a mínim es necessiten, s'han de realitzar una sèrie d'aixecaments de la via.

- Es carrega de balast al tren de tremuges i es realitza l'abocament al llarg de la via (figura 2.2.12.a).
- A continuació mitjançant la següent maquinària pesada es col·loca la via en la seva situació final. L'alineació i anivellació es realitza mitjançant un làser assegurant així una precisió millor.
 - § Batonadora: amb un rendiment de 1500 m/h es realitza la batuda de les travesses de tres en tres. És un grup combinat d'aixecament i ripat (figura 2.2.12.b).
 - § Estabilitzador: es realitza un esforç transversal de 240 KN sobre cinc travesses, amb una compressió del balast de $0,08 - 0,3 \text{ N/cm}^2$ i una vibració transversal amb una freqüència compresa entre els 0 i 45 Hz (figura 2.2.12.c).
 - § Perfiladora
 - § Raspalladora
- Per arribar als 35 centímetres que es requereixen sota travessa, en la posició del carril interior, el conjunt d'actuacions que es necessiten són fins a cinc aixecaments i tres estabilitzacions.
 1. *Llit de balast*: les travesses es col·loquen sobre un espessor que permet tenir 183mm sota les mateixes.
 2. *Aixecament previ*: després d'un primer abocament amb les tremuges i el posterior aixecament de la via s'arriba fins als 223mm.
 3. *Estabilització*: la cota minva fins als 211mm.
 4. *Aixecament previ*: amb el mateix procediment s'aconsegueixen 40mm fins als 251.
 5. *Aixecament previ*: amb el mateix procediment s'aconsegueixen 40mm més fins als 291.
 6. *Aixecament (1a anivellació)*: es guanyen 40mm fins arribar als 331.
 7. *Estabilització*: una nova estabilització redueix el gruix i el deixa als 323mm.
 8. *Aixecament (2a anivellació)*: es guanyen 30mm més fins arribar als 352.
 9. *Estabilització*: l'estabilització final deixa un gruix de 350mm sota la travessa interior.

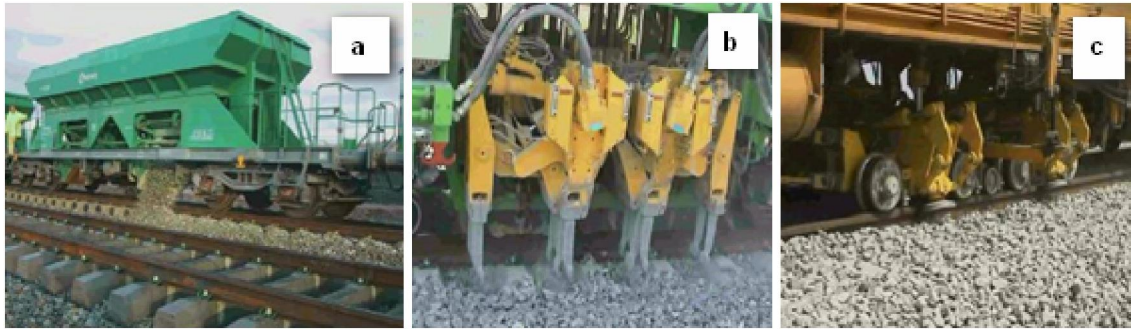


Figura 2.2.12. a) Abocament de balast mitjançant el vagó de tremuges. b) Detall de la batanadora. c) Detall de l'estabilitzador, extret de [9].

9 - Alliberació de tensions

- De forma aproximada 100 metres de carril es pot arribar a allargar 1mm a l'augmentar 1°C la seva temperatura. Per aquest motiu per permetre les dilatacions i retraccions i descarregar d'aquesta manera dels esforços interns que es produïrien, es procedeix a retirar les subjeccions dels extrems (figura 2.2.13.a) dels carrils encara no soldats per a que es puguin moure lliurement. Una vegada la cala ja està ajustada ja es pot procedir a la soldadura final (figura 2.2.13.b).



Figura 2.2.13. a) Alliberació de tensions. b) Ajust de cala per la soldadura final, extret de [9].

2.2.7. Secció tipus

En la figura 2.2.14.a i b es mostra la secció transversal d'una via doble sobre balast en un tram recte i construïda sobre una plataforma natural. Tal i com es pot observar la plataforma per a via doble ocupa 14 metres d'amplada i té una entreeva de 4,70 metres. En si mateixa ja té una inclinació a dues aigües del 5% de pendent per tal de garantir el drenatge. Immediatament a sobre de la plataforma hi ha la capa de subbalast de 30 centímetres de gruix. A sobre del subbalast hi ha la capa de balast amb un gruix mínim de 35 centímetres sota la part interior de les travesses i 42,5 centímetres en la part exterior. Amb la incorporació d'una capa de grava de 20 centímetres i una d'arena de 15 s'aconsegueix una millor distribució de pressions sobre la infraestructura. En l'annex I hi ha diferents figures més detallades d'aquest tipus de via.

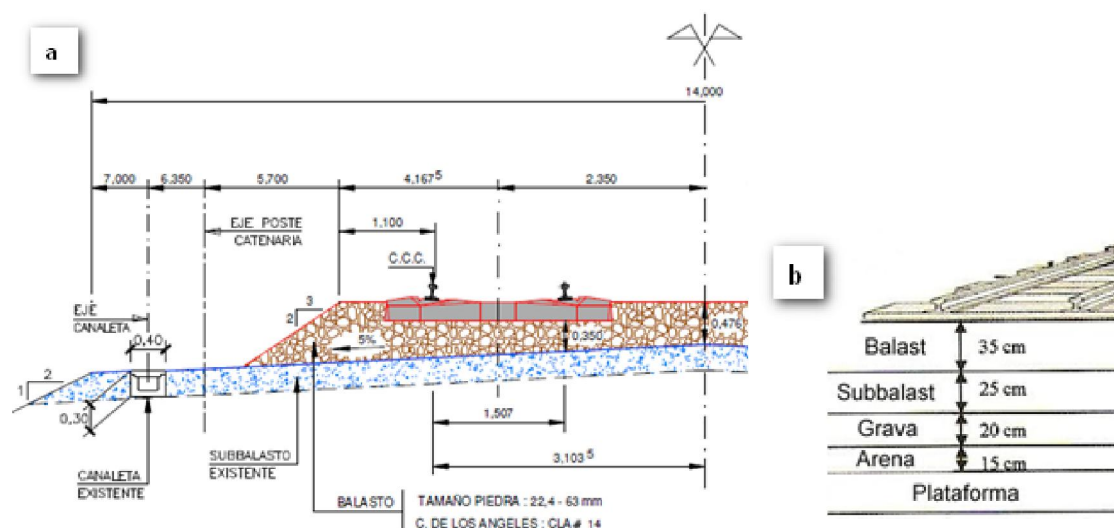


Figura 2.2.14. a) Secció tipus de la via de balast, extret [9]. b) Capes de la plataforma, extret de [1].

En la situació en que la via està en un tram de corba els recreixements del balast sota les travesses són qui donen el peralt requerit per la geometria, ja que la plataforma en si no té una inclinació com en el cas dels d'eixos viaris. La plataforma com en els trams de via recta només té les inclinacions dels 5% a dues aigües per a l'evacuació de l'aigua.

Quan la traça es troba sobre una obra de fàbrica, com per exemple un viaducte, la capa de balast descansa sobre l'estructura de formigó. Per disminuir el nivell de pressions que arriben a la plataforma s'augmenta lleugerament, de l'ordre de 2 a 3 centímetres, el gruix del balast. A més a més es col·loquen sota les travesses soles elàstiques per dotar de major elasticitat al conjunt de la via, doncs així d'aquesta manera no cal reduir la distància entre travesses per a reduir el nivell de pressions. En aquests tipus d'obres es dona a la plataforma una lleugera inclinació a dues aigües del 2% per ajudar al drenatge.

En el cas dels túnels encara que sigui a cel tancat també hi ha filtracions d'aigua i per tant es fa necessari evacuar-la quan sigui necessari. Per aquest motiu al damunt de la solera plana s'hi construeix una llosa de formigó amb una inclinació del 2% a dues aigües que ajuda a la circulació de l'aigua cap al col·lector central. Com en el cas de les obres de fàbrica s'augmenta el gruix del balast sota les travesses en 2 – 3 centímetres i a més a més es col·loquen sota les soles elàstiques sota les travesses en tota la longitud del túnel i a 16 travesses més a l'entrada i sortida del mateix.

En l'annex 1 es mostren les figures corresponents a cada cas de via sobre plataforma natural, obra de fàbrica i túnel.

2.3. Via sobre placa

Es podria definir la via en placa com la via en la que el balast s'ha substituït per una o varies capes de materials. En general el balast es canvia per una llosa de formigó, una base asfàltica o bé una base metàl·lica. Aquesta metodologia de via sorgeix de la necessitat de conciliar factors com la qualitat, seguretat i fiabilitat d'una via amb el mínim cost de manteniment possible, és a dir, l'objectiu és substituir el balast per un altre material que ofereixi una millor estabilitat al conjunt de l'engraellat de la via.

En algunes tipologies inclús es substitueixen les travesses a més a més del balast, en general però, del conjunt d'elements de la via es pot prescindir de totes les parts excepte del recolzament elàstic de sota del carril i de la llosa portant, que és l'element que caracteritza cada tipologia de placa.

Els orígens de la via en placa es remunten a principis del segle XX, quan l'any 1924 al Japó es van dur a terme les primeres experiències. No va ser fins l'any 1966 quan es va fabricar la primera llosa anomenada Shinkansen en la línia Tokaido – Shinkansen entre Tokio i Osaka, els dos motors econòmics del país nipó. Aquesta va ser la primera línia d'alta velocitat que es va posar en servei en la història del ferrocarril, que de fet, va significar l'aparició d'aquest nou sistema de transport. L'aparició de la línia Shinkansen va ser producte de l'elevada demanda entre les dues ciutats. Trens més ràpids permetien una major freqüència i per tant, una major capacitat de transport. El resultat va ser que el viatge es va reduir a la meitat, de 6 hores i mitja a unes 3 hores. Una de les grans característiques del Shinkansen és la seva elevadíssima freqüència de servei, que de mitjana és de 6 minuts des de Tokio (Pigem [12]). Com a conseqüència era completament imprescindible que les operacions de manteniment es reduïssin al màxim, aquest fet va propiciar la instal·lació de via sobre placa que degut al seu baix manteniment permetia que es pogués oferir aquest nivell de servei.

El 1972 a l'estació de Rheda (Alemanya) s'hi van instal·lar travesses unides per armadura longitudinal, ancorades a una llosa de formigó sobre dues subbases rígides. En aquesta mateixa dècada dels 70 França i la Gran Bretanya van desenvolupar els sistemes Stedef i PACT respectivament. Però no va ser fins als anys 80 quan es va produir el desenvolupament teòric i experimental de la via en placa, ja que va ser en aquests anys quan es va començar a implantar en túnels, viaductes, estacions, metro, línies de rodalies, etc. Durant la dècada dels 90 es van desenvolupar els primers sistemes exclusius per a línies d'alta velocitat, Alemanya va ser a nivell europeu el país que va tenir la primera línia amb aquesta nova tecnologia i a Espanya es va crear un grup de treball per al seu estudi.

2.3.1. Els diferents tipus de via sobre placa

Actualment existeixen al mercat diferents models que aposten per aquesta tecnologia. De manera molt simplificada es poden distingir en funció de si l'ús final de la via serà per a un sistema d'alta velocitat i mixt o bé si serà per a sistemes lleugers com els metros i tramvies. A més a més es pot distingir morfològicament segons el seu sistema de fabricació entre in – situ o prefabricat. Donat aquest ampli ventall de tipologies la UIC (International Union of Railways) l'any 2002 va estipular set tipus diferents de via en placa en funció dels components i nivells d'elasticitat que ofereix cada sistema, tal com es mostra a la figura 2.3.1.

CLASIFICACIÓN DE LA VÍA EN PLACA		Familias						
		1	2	3	4	5	6	7
Componentes	Sistema de sujeción	No lleva	Con sistema de sujeción según EN13481					
		Hilos de carril independientes		Posicionamiento y nivelación del carril mediante elementos prefabricados				
	Elementos reemplazables			No lleva		Son posibles		
	Método constructivo			Con traviesas		Con traviesas		Con losas
		arriba/abajo vertido de resina in situ		arriba/abajo vertido de hormigón de relleno	incrustado de traviesas en hormigón por vibración	abajo/arriba apoyo de hormigón o asfáltico	arriba/abajo elastómero entre traviesa y losa	arriba/abajo unión de losas mediante mortero bituminoso
1 nivel elástico	A	Carril embebido	Pose directo monolítico	-	-	-	-	-
		EDILON	PACT					
2 niveles elásticos con placa intermedia	B	-	Pose directo de doble elasticidad y placa intermedia	Vía monolítica con hormigón de relleno	Vía monolítica incrustada por vibración	Traviesas colocadas sobre estructura soporte de:	-	Unión de losas mediante mortero bituminoso no elástico
			Züblin BTE Heilit W. BES APPITRACK Crailsheim FCC Rasengleis Hochtief SM Pose directo	RHEDA RHEDA Berlin RHEDA 2000 HEITKAMP	ZÜBLIN	Hormigón BTD Asfalto WALTER GETRAC ATD SATO		BÖGL
≥ 2 niveles elásticos con bloque intermedio	C	-	Pose directo de doble elasticidad y bloque intermedio	-	-	-	Traviesas incrustadas mediante elastómero	Unión de losas mediante mortero bituminoso elástico
			NS Blokkenspoor SONNEVILLE				STEDEF SATEBA	JNR ÖBB-PÖRR IPA

Figura 2.3.1. Classificació UIC de via en placa, extret de [10]

Donat que aquesta classificació pot semblar poc clarificadora a nivell de comprensió, existeix una classificació alternativa, també amb set famílies segons el disseny, que les ordena en funció de la tipologia de llosa (formigó o mescla bituminosa), segons el comportament estructural i finalment segons el seu disseny. A més a més també es mostren exemples de cada tipus (figura 2.3.2).

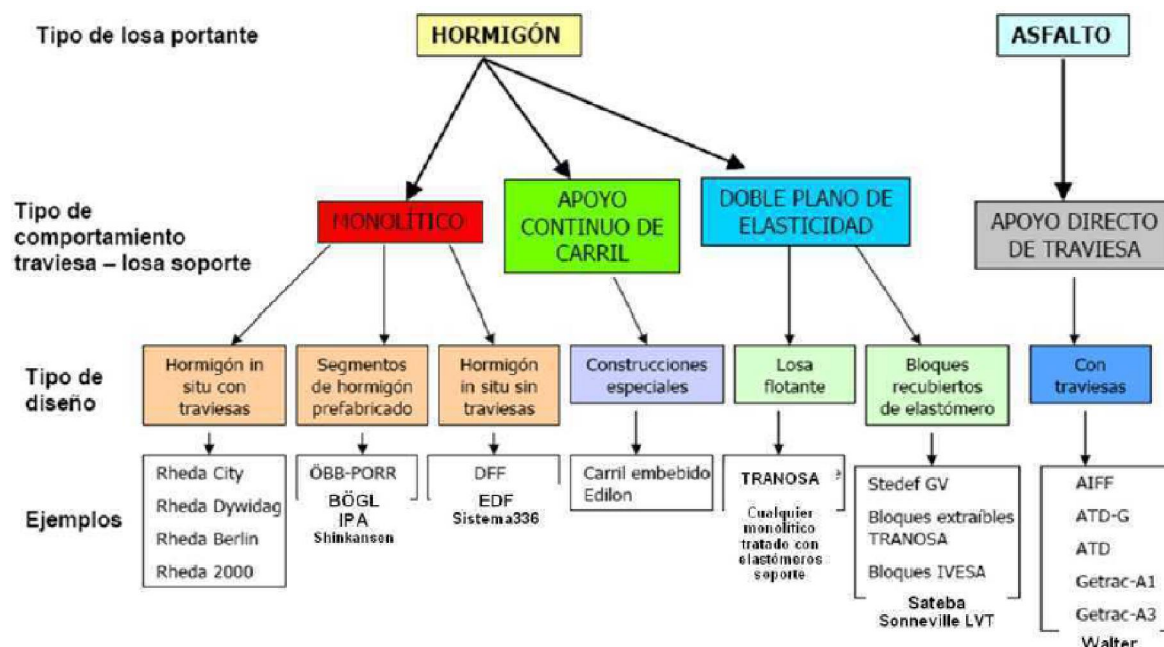


Figura 2.3.2. Classificació alternativa de via sense balast, extret de [10].

2.3.1.1. Tram d'assaig de diferents tipologies de via en placa.

L'any 2002 es va construir en la línia València – Tarragona, concretament al tram comprès entre Les Palmes de Castelló i Oropesa del Mar (corredor del Mediterrani), un tram d'assaig amb 6 models diferents (resumits en la taula 2.2.1) d'aquest tipus de via amb una longitud de 432 metres cadascun, dels quals una part són en terraplè i una

altra en desmunt. Entre els trams també hi ha parts de transició amb un total de cinc. Aquestes estan ubicades a l'inici i final del tram i cada dos tipus de plaques consecutives. A més a més entre el tram de via sobre formigó i aglomerat existeix un tram exclusiu de balast per a l'estudi de la transició.

Tipus de llosa	Placa implementada			
	Edilon	Rheda Dywidag	Rheda2000	Stedef
Formigó				
Aglomerat asfàltic	Getrac		ATD	

Taula 2.3.1. Tipus de plaques del tram d'assaig.

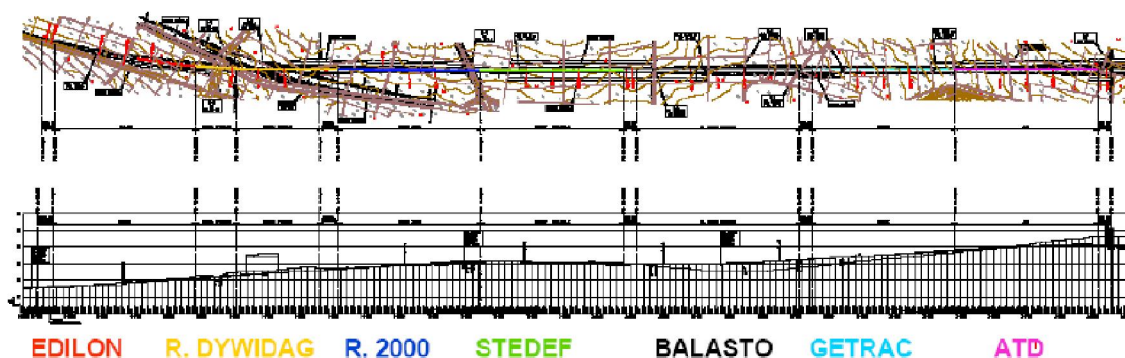


Figura 2.3.3. Planta i secció longitudinal del tram d'assaig, extret de [10].

Promogut per la Direcció General de Ferrocarrils del Ministeri de Foment l'estudi comptà amb tres fases, primerament una fase d'estudis previs en el qual es va recopilar informació sobre diferents models, l'estudi i la configuració dels trams d'assaig. La següent fase de construcció es va encarar en el control i obtenció de dades in situ sobre la construcció dels diferents models utilitzats. Finalment la última fase consistia en la recollida de dades i obtenció de conclusions mitjançant campanyes periòdiques d'auscultació.

D'aquests models quatre són de procedència alemanya (Edilon, Rheda Dywidag, Rheda Dywidag i Gedra), un de francesa (Stedef) i un d'holandesa (ATD). En l'àmbit estatal cal remarcar que també s'ha desenvolupat una tecnologia pròpia de via sobre placa desenvolupada per AFTRAV que s'anomena DEDRA, però que degut a la seva innovació encara no s'ha estès el seu ús comercialment. Donada l'àmplia experiència del sistema Rheda2000 a cel obert en les vies alemanyes i als alts rendiments de muntatge degut a la estandarització d'aquests, ADIF ha decidit utilitzar la placa Rheda2000 en tots els seus túnels i viaductes de les línies d'alta velocitat. En l'annex II es mostra un recull dels principals tipus de via en placa que actualment estan en el mercat amb les seccions més característiques de cada tipus.

2.3.2. El model RHEDA2000

Per aquest motiu en la present tesina es considera el model Rheda2000 per l'estudi de les zones de transició entre el balast i la via sobre placa. Es tracta d'una placa de comportament monolític que utilitza travesses i formigó in situ.

La base del sistema RHEDA 2000 va ser una estructura de via que es va construir per primera vegada l'any 1972 a Alemanya, concretament a l'estació de Rheda que pertany al tram de la línia Bielefeld – Hamm. Des de llavors aquest sistema ha evolucionat de manera que en els últims 10 – 15 anys ha passat de ser una elecció per

a segments de construcció especial a una alternativa a tenir molt en compte en la construcció de la superestructura, sobretot per a trams amb demandes d'alta velocitat o càrrega extrema.

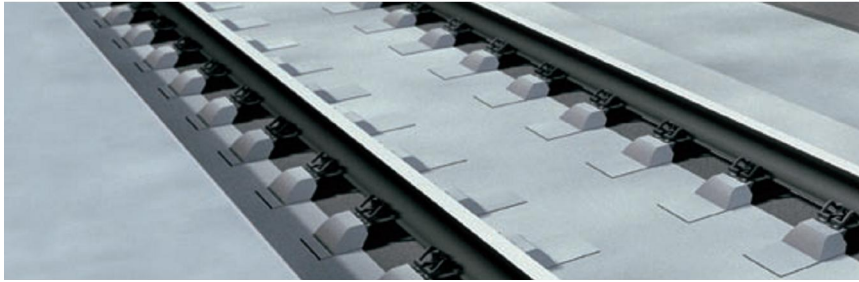


Figura. 2.3.4. Visualització de la placa rheda2000, extret de [11].

Des de la seva aparició, al llarg dels anys la tecnologia i les dimensions dels diferents elements han anat variant per tal d'aconseguir unes prestacions millors. En els següents esquemes es mostra el perfil transversal de la via amb els elements que la integren. Per poder comparar els diferents models es pren com a cota "0" de referència la cara superior dels dos carrils (NSC), es considera que la capa inferior (capa portant i aïllant) té la mateixa amplada en tots els casos i també per a la placa portant on s'hi instal·la l'armadura.

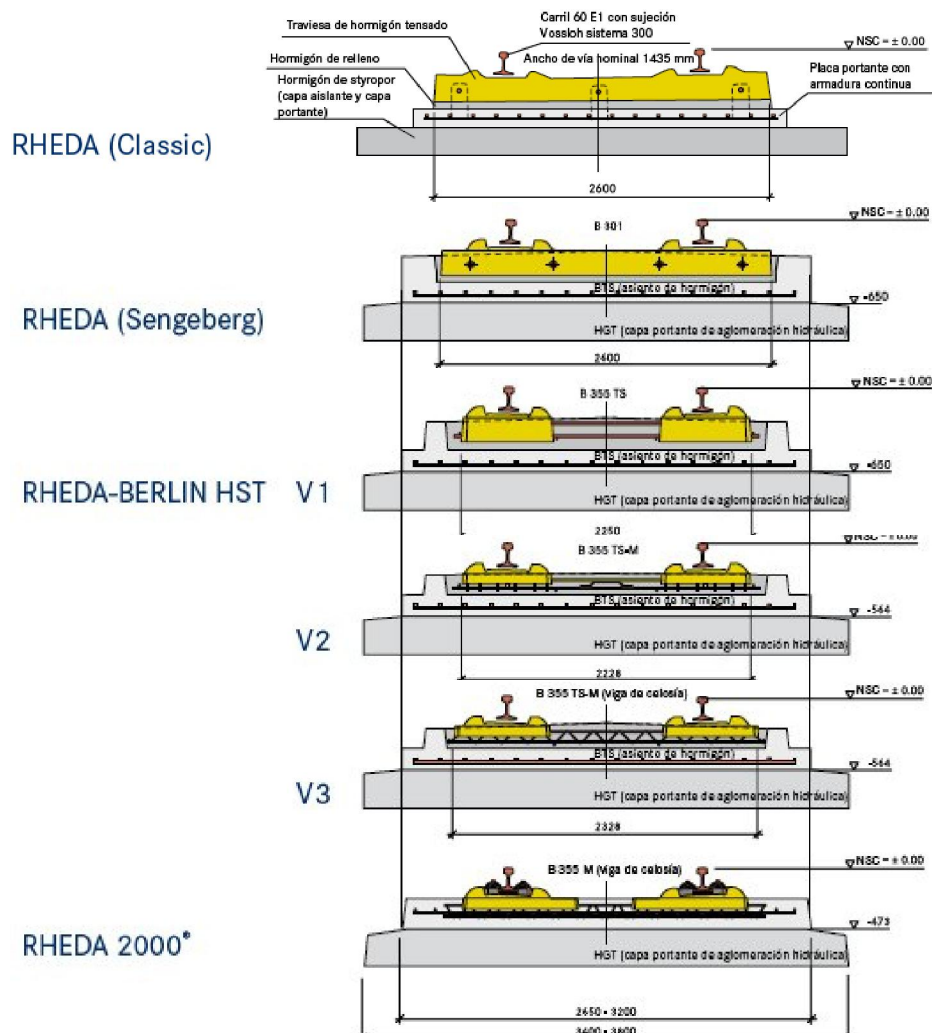


Figura. 2.3.5. Seccions transversals de les diferents versions de via en placa, extret de [11].

Com es pot apreciar en la figura 2.3.5 les principals diferències entre les diferents etapes d'evolució són:

- Pas de travessa monobloc del primer model Rheda classic al bibloc del model Rheda – Berlin, ja que d'aquesta manera es redueix el pes del conjunt i es millora el comportament enfront a les vibracions.
- Augment de la quantia d'armadura, sobretot transversal, i introducció de la gelosia en el model Rheda – Berlin HST a partir de la versió número 3.
- En el model Rheda2000 s'elimina l'artesa de formigó i la llosa es recolza directament sobre una subbase de 30 centímetres de gruix. D'aquesta manera hi ha una disminució del gruix de la placa que comporta un menor gàlib i un menor pes del conjunt.

2.3.2.1. Exemples d'utilització

Des de l'any 1991 s'han construït més de 800 quilòmetres de via en placa al conjunt d'Alemanya, com a exemples s'enumeren diferents trams que han estat construïts amb aquest sistema:

Alemanya:

- Colonia – Frankfurt
- Nüremberg – Ingolstadt
- Enllaç nord-sud de Berlin

Holanda:

- Línia Amsterdam – Brusel·les

Taiwan:

- Línia d'alta velocitat Taipei – Kaohsiung, que uneix la capital al nord de la illa amb aquesta ciutat del sud, s'hi va subministrar aquest sistema en la zona de les estacions.

Espanya:

- Madrid –Valladolid, túnel del Guadarrama de 27 km. Primera línia d'alta velocitat de l'estat en la qual es va implementar aquest sistema.
- Utilització de la via en placa en tots els viaductes i túnels en línies d'alta velocitat de nova construcció des de l'any 2005.
- En estacions amb parada: blocs o carril embegut del tipus DFF o PAD.

2.3.3. Components del sistema

El fet d'instal·lar via sobre placa en un línia de ferrocarril té unes implicacions sobre el projecte a tenir en compte tant en la superestructura com infraestructura. En aquest apartat es comenta quines són les actuacions que s'han de tenir en compte sobre els components de la via següents: subjeccions, travesses, terraplens, desmunts i túnels.

2.3.3.1. Subjeccions

El mal comportament de la placa envers a les vibracions és degut a la poca elasticitat que ofereix el formigó. Per aquest motiu les subjeccions desenvolupen un paper bàsic per tal de dotar al conjunt de la via una elasticitat suficient, de fet en gran mesura és l'element que dona l'elasticitat de la totalitat de la via. Si l'elasticitat és massa gran es produeix un major desgast sobre el material rodant, afectant de manera directa al confort i seguretat del viatger.

Per aquest motiu cada tipus de placa té una subjecció associada que optimitza el conjunt. Els requisits que s'exigeixen estan descrits segons la normativa UNE-EN 13481-5:2003 ("Aplicaciones ferroviarias. Vía. Requisitos de funcionamiento para los sistemas de sujeción. Parte 5: sistemas de sujeción para vía en placa").

De forma general es poden classificar les subjeccions en tres tipus:

- *Elàstiques indirectes amb plaques d'assentament d'elasticitat bilineal.* Per exemple: Pandrol Vipa.
- *Elàstiques, directes o indirectes, amb múltiples plaques (rígides d'assentament, blocs o plaques de distribució de càrrega).* Per exemple: loarv 300 de Vossloh.
- *Realitzades mitjançant l'encepat o embegut del carril.* Per exemple: Corkelast de Edilon

En el cas particular de la placa Rheda2000 la subjecció que s'utilitza és la loarv 300 de la casa comercial Vossloh (figura 2.3.6.a i b). Aquests elements a més a més de proporcionar elasticitat a la via han de permetre la regulació i ajust de la geometria del carril després de la seva construcció. En el cas concret d'aquesta subjecció les toleràncies d'ajust són les següents:

- Regulació en altura: $-4/+26$ mm
- Regulació lateral: ± 5 mm
- Elasticitat placa d'assentament: $25,5 \pm 2,5$ kN/mm
- Deflexió de 1,5 mm, amb una càrrega per eix de 22,5 t.

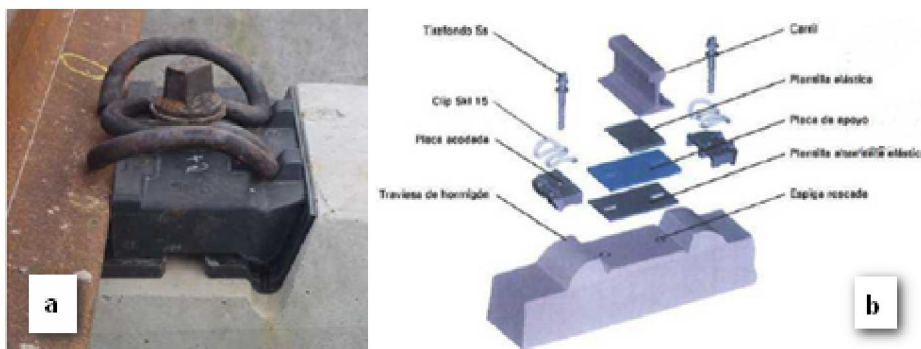


Figura 2.3.6. a) Subjecció loarv 300 completament instal·lada. b) Conjunt d'elements de la subjecció loarv 300. Extret de [10].

2.3.3.2. Travessa B-355

La travessa de la figura 2.3.7 és la utilitzada per a la via en placa del tipus Rheda200. Es tracta del model B-355 modificat de tipus bibloc, de formigó i per a vies d'ample internacional (1435 mm) que utilitzin el carril tipus UIC 60 (60 kg/ml).

Travessa	Pes	Àrea	Longitud	Dimensions del bloc	Altura
B-355.3 U60-20M	197 kg	5230 cm ²	2234 mm	914 x 286 mm	198,5 mm

Taula 2.3.2. Característiques de la travessa B-355. Extret de [11].

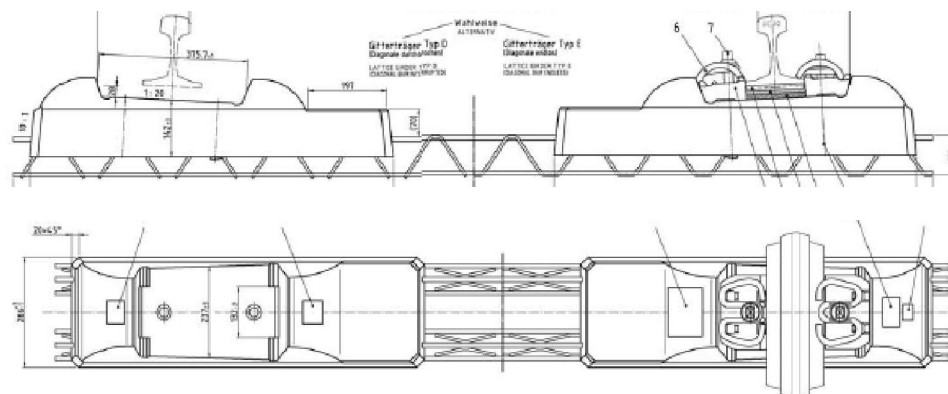


Figura 2.3.7. Alçat i planta de la travessa B-355, extret de [10].

2.3.3.3. Tractament en terraplens i desmunts.

En vies no urbanes que es construeixen a cel obert l'objectiu principal és assegurar l'assentament zero, tan en terraplens com en desmunts. Per aquest motiu s'han d'implementar algun dels següents tractaments que s'exposen a continuació:

- Millores generalitzades del terreny, per assegurar assentaments nuls: té un cost assumible però existeixen incerteses respecte al resultat final.
- Construcció de pseudo-ponts de suport o falsos terraplens: garanteix un bon comportament del terreny però té un cost elevat.
- Construcció de lloses de suport de formigó armades que siguin capaces de suportar moments flectors significatius: és una solució costosa que prové de l'experiència en infraestructures viàries.

En terraplens la disposició de capes recomanable des de la base fins a la coronació és la que es mostra a la figura 2.3.8 per a sòls de qualitat mitjana. Com es pot observar per aconseguir una altura de terraplè de 10 metres, que és el màxim a que es pot aspirar només amb l'ús de terres, és necessari sanejar una profunditat de 2 metres la base del terraplè. Aquesta ha d'estar composta per 1 metre d'escullera i tot recobert amb una capa de geotèxtil. A continuació es pot procedir a l'execució del nucli del terraplè amb materials de bona qualitat i amb una inclinació 2H:1V fins assolir la cota màxima dels 10 metres. Per tant, per aconseguir en coronació 14 metres per a la plataforma són necessaris 54 metres en la base.

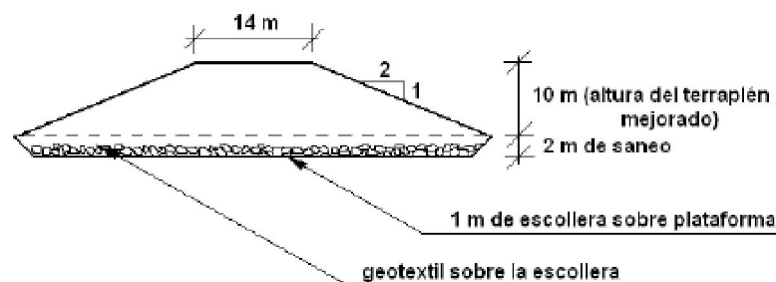


Figura 2.3.8. Perfil transversal per terraplén en vies de placa, extret de [10].

En desmunts (figura 2.3.9) no existeix una limitació de la profunditat de trinxera en termes d'assentaments. L'única intervenció que es requereix és actuar en la base del fons del desmunt sobre la qual es construirà la plataforma. Com en terraplens es saneja una profunditat de 2 metres i es diposita 1 metre d'escullera i es cobreix amb una capa de geotèxtil.

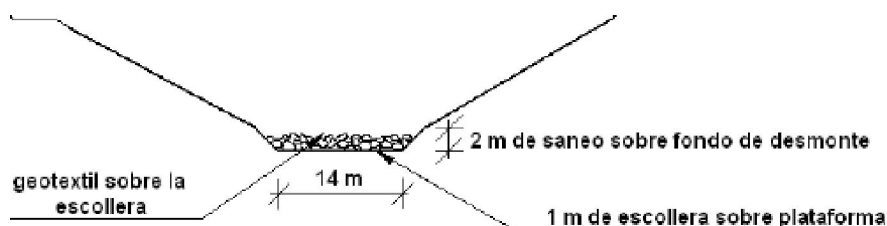


Figura 2.3.9. Perfil transversal per desmunts en vies de placa, extret de [10].

En la taula 2.3.3. es mostra un resum dels requisits necessaris per a l'execució dels terraplens o desmunts en funció del tipus de terreny de que es disposa i la seva qualitat.

De les observacions d'aquesta taula es desprèn que per altures superiors a 10 metres i en sòls deformables que no tinguin un tractament específic s'ha de prescindir de la via en placa i instal·lar via sobre balast. Una forma de poder saltar-se aquestes restriccions és utilitzant pseudo-ponts o bé lloses de suport com ja s'ha comentat anteriorment.

ELEMENTO	TERRENO APOYO	REQUISITOS ADICIONALES	OBSERVACIONES
TERRAPLÉN	Roca	<ul style="list-style-type: none"> Mejora calidad del terraplén con material de préstamos 	<ul style="list-style-type: none"> Para alturas $H \geq 10 - 15$ m vía en balasto
	Suelo calidad media	<ul style="list-style-type: none"> Mejora calidad del terraplén con material de préstamos Saneo ≥ 2 m Escollera y geotextil 	<ul style="list-style-type: none"> En suelos deformables, sin tratamiento específico, vía en balasto
	Suelo deformable	<ul style="list-style-type: none"> Mejora calidad del terraplén con material de préstamos 	<ul style="list-style-type: none"> En el fondo del saneo se colocará una base de escollera
DESMONTE	Roca	<ul style="list-style-type: none"> Sin requisitos adicionales 	<ul style="list-style-type: none"> En el fondo del saneo se colocará una base de escollera
	Suelo calidad media	<ul style="list-style-type: none"> Saneo ≥ 2 m Escollera y geotextil 	
	Suelo deformable	<ul style="list-style-type: none"> Sin requisitos adicionales 	

Taula 2.3.3. Requisits per a l'execució de terraplens i desmunts, extret de [10].

En la figura 2.3.10.a, b i c es mostren diferents vistes de la constitució d'uns pseudo-pont, com es pot observar es tracta d'una composició formada per un conjunt de pilars inclinats que van des de la base del terraplè fins a la llosa de formigó sobre la qual s'instal·la la via en placa. Amb aquesta metodologia es garanteixen uns assentaments controlats ja que la plataforma de via no es recolza directament sobre el terreny.

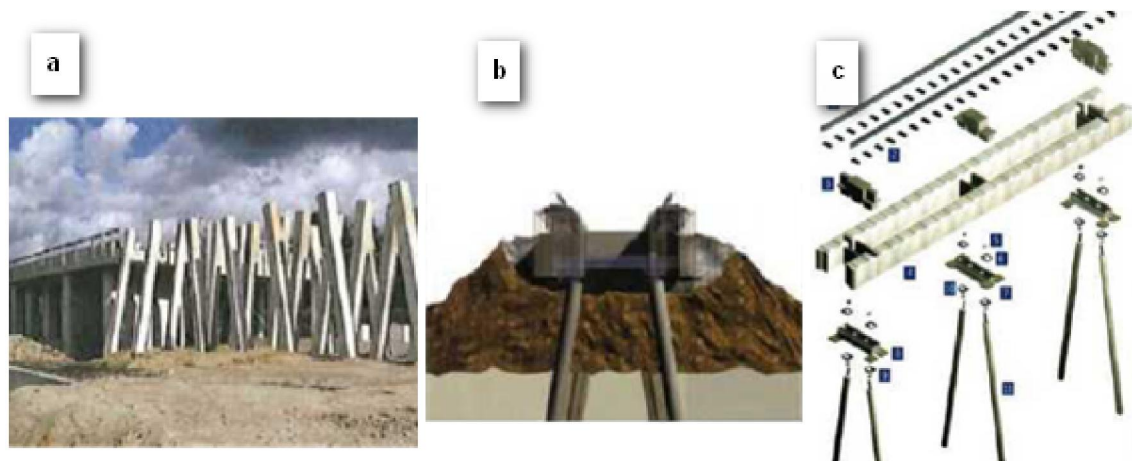
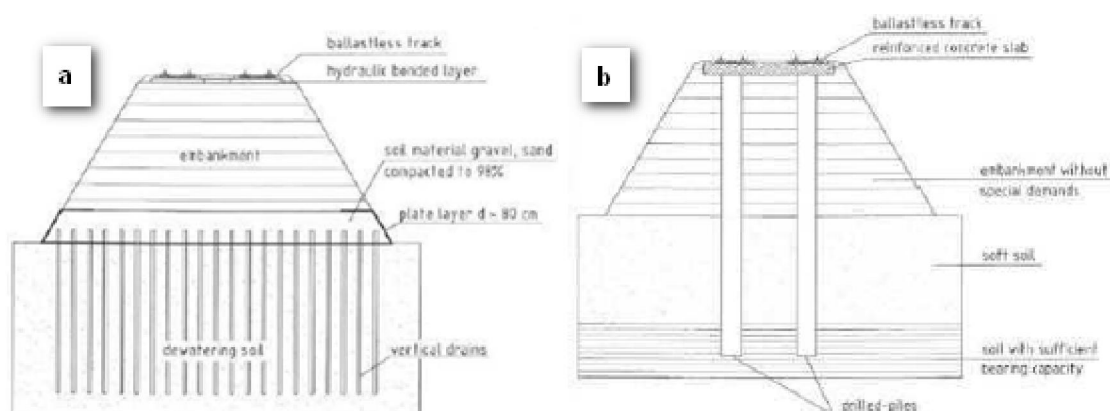


Figura 2.3.10. a) Pseudo-pont a continuació d'un viaducte. b) Perfil transversal d'un pseudo-pont. c) Components d'un pseudo-pont. Extret de [10].

Una forma alternativa per aconseguir l'objectiu d'assentaments zero és mitjançant la construcció de falsos terraplens. Consisteix en recolzar el conjunt del terraplè sobre una banqueteta de 80 centímetres de gruix composta per grava i sorra amb una compactació del 98%. Aquesta banqueteta per la seva part està recolzada sobre un conjunt de drens verticals situats sobre un estrat de desguàs (figura 2.3.11.a). En cas que el terraplè s'hagi de construir sobre un terreny tou un procediment és construir pilars que uneixin la llosa de formigó sobre la qual va situada la via i un estrat del subsòl amb suficient capacitat per a resistir els esforços (figura 2.3.11.b). Una altra forma seria la d'executar un conjunt de piles de grava-ciment que vagin des de la cimentació del terraplè a una capa de sòl amb suficient resistència (figura 2.3.11.c).



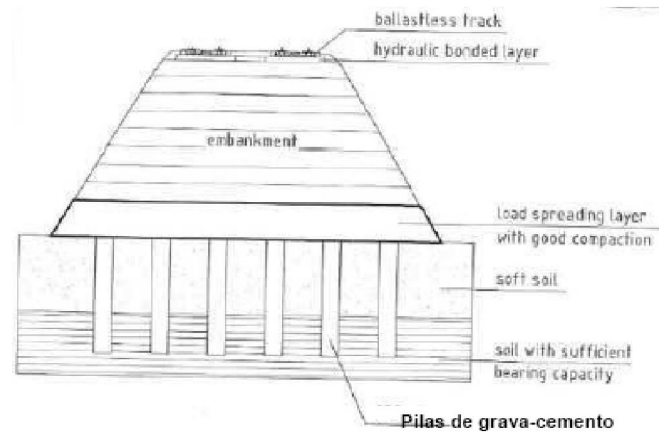


Figura 2.3.11. a) Falsos terraplens amb drens. b) Execució mitjançant pilars. c) Terraplè recolzat sobre piles de grava-ciment. Extret de [10].

2.3.3.4. Tractament en viaductes

En aquest tipus d'estructures els millors avantatges es poden obtenir si el viaducte ha estat específicament projectat per a un sistema i tipologia concrets de via en placa. Per aquest motiu el tipus de via en placa ha de garantir les següents característiques:

- La compatibilitat dels moviments verticals del tauler amb els de la llosa portant del sistema de via en placa.
- La limitació dels moviments transversals del tauler respecte l'estrep o de taulers entre si. En la figura 2.3.12.a i b es mostren dos exemples de com es realitza aquesta transferència, mitjançant sòcols que sobresurten de la llosa del tauler s'absorbeixen les forces longitudinals i transversals.
- La correcta transmissió d'esforços transversals i longitudinals a l'estructura.

En funció dels moviments longitudinals que presenta el pont existeixen diferents disposicions de la via sobre l'estructura:

- Llosa fixada a l'estructura; les travesses i la llosa portant estan fixades al tauler del pont, amb subjecció elàstica, del tipus semilliscant.
- Llosa lliure sobre l'estructura, amb possibilitat de desplaçament longitudinal sobre la mateixa. Ambdós elements estan separats per una capa elastomètrica o similar.
- Via lliscant sobre la llosa, es tracta d'un sistema amb capes asfàltiques que permet que la via pugui moure's lliurement sobre la llosa.

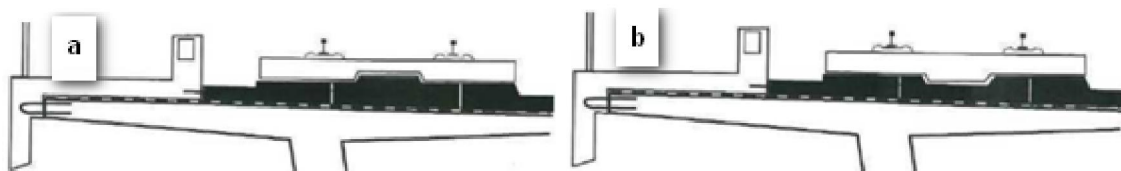


Figura 2.3.12. a) Metodologia per a la transferència d'esforços transversals amb travesses recolzades directament. Transferència amb el mascle al tauler del viaducte. b) Transferència amb el mascle en la llosa de la via. Extret de [10].

D'altra banda, per al cas concret de la Rheda 2000 es distingeix si la longitud total del viaducte supera els 25 metres. En el cas que sigui així la llosa es construeix per segments, de 3,5 a 7 metres, i separada del tauler per una capa d'elastòmers o una coberta de protecció. Per longituds de l'estructura inferiors als 25 metres la llosa no es construeix per segments sinó continua.

2.3.3.5. En túnels

Igual que en el cas dels viaductes si quan es projecta el túnel es té en compte un tipus de placa específic els avantatges que s'obtenen són els següents:

- Reducció de la secció d'excavació.
- Eliminació de les activitats de manteniment de la via dins del túnel.
- Millora de l'estabilitat i disponibilitat de la via dins el túnel on l'accés acostumen a ser més difícils.
- Facilitat d'evacuació a peu per part dels viatgers en cas de necessitat.
- Facilitat de l'accés dels vehicles d'emergències.
- Absència d'assentaments i aigua procedent de filtracions i drenatges.

2.3.3.6. Manteniment

Les operacions de manteniment són bàsiques per garantir el nivell de servei que ofereix una línia ferroviària. El fet de tenir un manteniment molt inferior respecte les vies de balast, de l'ordre del 20% al 30%, atorga a les vies en placa la capacitat d'oferir viatges amb una freqüència major sense comprometre la qualitat del servei.

Així doncs les operacions de manteniment es poden ser de dos tipus

- *Preventiu*: mitjançant inspeccions periòdiques en les que es comprova l'estat de les subjeccions, les soldadures i el desgast. Durant els primers mesos de posta en servei és convenient vigilar la fisuració de la placa.
- *Puntual*: per corregir possibles defectes puntuals.

En la taula 2.3.3 es compara econòmicament la implantació d'un o altre sistema per a un nivell de tràfic mitjà d'una via d'alta velocitat, sense tenir en compte desviaments de via que encareixen tant la construcció com el manteniment. Es pot observar com el cost del manteniment de la placa és aproximadament un 47% menor respecte al balast. Si es té en compte que la inversió inicial és un 40% superior, llavors si es fa un anàlisi de rendibilitat econòmica el període d'amortització seria aproximadament de 24 anys.

	Nivell de tràfic	Mitjà
Via en balast	Cost d'inversió inicial (€/km)	930.000 €
	Cost de manteniment (anual)	43.500 €
Via en placa	Cost d'inversió inicial (€/km)	1.307.000 €
	Cost de manteniment (anual)	20.717 €

Taula 2.3.4. Cost d'inversió i manteniment de la via en placa i la via sobre balast. extret de [10].

2.3.4. Avantatges del sistema de via en placa.

A continuació s'enumeren alguns dels principals avantatges que ofereix la tecnologia de via en placa.

- Estabilitat, precisió i confort:
Es garanteix un assentament de via estable i durador, a més a més suporta bé les càrregues a que l'alta velocitat sotmet a la via gràcies a la seva qualitat,

funcionalitat i seguretat. Aquestes prestacions s'aconsegueixen gràcies a la possibilitat d'ajust mil·limètric de l'estructura durant el seu muntatge in-situ. Això és la clau per aconseguir un desgast baix dels vehicles i un gran confort durant el viatge.

- Larga vida útil i escassa necessitat de manteniment:
Aquest és un dels principals punts forts, gràcies a una vida útil de 60 anys com a mínim, sense quasi necessitat de manteniment el sistema ofereix alta disponibilitat i bona rendibilitat per a línies d'alta velocitat.
El període de retorn per tal de recuperar la inversió està comprès entre els 20 i 30 anys a l'estat Espanyol, en canvi al Japó aquest període és de 9 anys.
 - Aplicació flexible i universal:
Degut a una altura de construcció relativament baixa i a la possibilitat de mantenir un assentament òptim de les vies es recomana aquest sistema en trams de via i desviaments sobre ferms de terra, ponts i túnels.
 - Bases per al traçat de via òptims:
La via en placa possibilita un traçat de via més rectilini en l'alta velocitat ja que permet construir corbes més tancades i amb inclinacions més pronunciades. D'aquesta manera es redueix el cost de l'execució de les obres.
 - Elevada precisió de l'ample de via i de la geometria de la via gràcies a la travessa
 - No es veuen superades les toleràncies de compensació en la subjecció del carril degut a errors d'alineació durant el muntatge.
 - No hi ha formació periòdica d'ondulacions ni verticals ni horitzontals al carril.
 - No existeixen requisits especials de toleràncies pels diferents components per separat
 - No hi ha fisuració longitudinal sobre la placa de formigó per l'absència de l'artesa de suport.
Cada 9 travesses s'instal·la una junta de dil·latació amb una profunditat d'un terç de la llosa.
 - Bones propietats del formigó gràcies a una tecnologia de formigó adequada als requisits.
- Últimament s'està substituint el formigó armat per formigó amb fibres de propilè per reduir la retracció ja que els elements elàstics de la via, com la placa d'assentament, absorbeixen les tensions que originen el pas dels trens. Només s'utilitza el formigó armat en les entrades i sortides dels túnels degut a les variacions brusques de temperatura.
- Elevats rendiments de muntatge, de l'ordre de 180 metres al dia.
 - Segons l'Oficina Federal Alemanya de Ferrocarrils (EBA) és possible reduir la quantia d'armadura de la placa portant de formigó en túnels.
 - Reducció del pes total de superestructura en ponts.

- Major protecció ambiental ja que no és necessari disposar de les canteres de balast, per al formigó de la placa es poden utilitzar àrids marginals i finalment, degut a la menor altura de la superestructura, és possible reduir el diàmetre dels túnels.
- Al no existir el balast, doncs s'evita la problemàtica que causa la volada del balast. Per tant la via en placa és més òptima per a velocitats molt altes, superiors als 330 km/h.

2.3.5. Desavantatges del sistema de via en placa

En el següent apartat es descriuen alguns dels desavantatges més característics degut a la implementació de la via en placa enlloc d'utilitzar via sobre balast.

- Capacitat de correcció de possibles defectes superficials molt petita.
- Necessitat d'una infraestructura lliure d'assentaments.
- Terraplens d'altures reduïdes, el recomanable és un terraplè de 5 metres d'altura i com a màxim es pot arribar als 10 o 12 metres.
- Necessitat de tractament del fons dels terraplens i desmunts.
- Major cost de la infraestructura.
- Necessitat de bons drenatges de la llosa.
- En cas de descarrilament d'un comboi, és possible que s'hagi de picar sobre la llosa de formigó per tal de corregir la possible averia.
- Comportament pitjor respecte a les vibracions i el soroll en comparació amb el balast. Per aquest motiu és necessari la implementació de plaques d'assentament més elàstiques en relació amb les vibracions. Donat que el medi no és porós no s'absorbeix tan soroll com en el balast. Degut a la reflexió sobre la superfície del formigó de la llosa portant el nivell de vibracions és més elevat. La forma més habitual de reduir aquest fenomen és col·locar capes absorbents.

2.3.6. Procés constructiu, tècnica de muntatge

Degut al seu origen i característiques la tècnica de muntatge de les vies en placa és diferent al muntatge de via tradicional sobre balast. Inclús aquesta nova tecnologia no està del tot mecanitzada ja que inclou algunes operacions manuals. Les diferències de muntatge quan la via és a cel obert o en espais tancats no són molt rellevants des del punt de vista de l'execució. Degut a les limitacions d'accés en túnels algunes operacions de premuntatge a cel obert estan més mecanitzades. A continuació es mostra el procediment que es segueix en la construcció de via en placa en túnels, partint de la solera d'aquest.

1 - Topografia prèvia

- Es situen unes bases de replanteig cada 180 metres (figura 2.3.13.a) als laterals del túnel conjuntament amb uns punts de marcatge (piquets cada 5 metres (figura 2.3.13.c) i bulons (figura 2.3.13.d) separats cada 40 metres). Aquests elements són els que permeten tenir unes referències per tal de col·locar la via en la seva posició exacta.



Figura 2.3.13. Aparells topogràfics, a) Base. b) Estació total. c) Piquets. d) Bulons. Extret de [9]

2 - Execució de la solera inferior

- El primer pas és l'execució de la llosa inferior de formigó de 30 centímetres de gruix, degut a la seva naturalesa aquesta es construeix amb formigó en massa amb una resistència de 20 N/mm² (HM-20). Per realitzar-la s'utilitza maquinària convencional i s'estén el formigó de forma manual (figura 2.3.14.a). Com en el cas dels viaductes amb longituds majors de 25 metres el formigonat d'aquesta llosa es realitza per segments.
- En aquest pas també es realitza el peralt de corba en cas de que els condicionants geomètrics així ho exigeixin.
- Es realitza el dau central en cas que la secció sigui de via doble, per tal de separar les lloses corresponents a cada sentit de via.
- S'executa la connexió dels drenatges de la via al col·lector central situat entre les dos vies.

3 - Posicionament de les travesses

- Es reparteixen les travesses apilades al llarg de la traça i posteriorment es van distribuint i posicionant al damunt de la llosa inferior. Aquesta operació es realitza de forma manual amb l'ajut d'una grua amb ploma (figura 2.3.14.b i c).

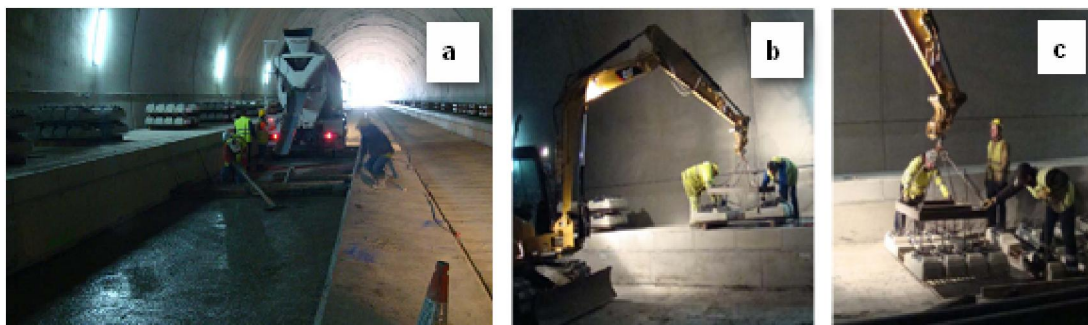


Figura 2.3.14. a) Formigonat de la llosa inferior mitjançant maquinària convencional. b) i c) Posicionament de les travesses. Extret de [9].

4 - Muntatge de la via

- Un cop situades les travesses es descarrega el carril en barres de 270 metres de longitud i a continuació es realitza el muntatge del carril sobre les travesses.
- Una vegada ja col·locat el carril i tancades les subjeccions, aquestes s'apreten provisionalment (figura 2.3.15.a).
- Per anivellar verticalment la via abans de procedir al formigonat de la llosa superior es situen uns fusos cada 1,80 metres al llarg de la traça (figura 2.3.15.b).
- L'alineació per la seva part es realitza mitjançant barres separadores situades cada 1,80 metres també de manera que coincideixin amb els fusos (figura 2.3.15.c).



Figura 2.3.15. Apretat de les subjeccions mitjançant motoclavadora hidràulica. b) Fusos situats cada 1,80 metres al llarg de la traça. c) Barra separadora. Extret de [9].

- Aquests fusos es recolzen sobre la llosa inferior i subjecten el carril entre les travesses (figura 2.3.16.c).



Figura 2.3.16. a) i b) Elements del fus espejejat. c) Fus instal·lat entre travesses. Extret de [9].

5 - Anivellació de la via

- Mitjançant una posicionadora s'aproxima la posició teòrica de la via tan en planta com en alçat (figura 2.3.17.a).
- A través dels piquets de via ubicats cada 5 metres s'obté la informació de cada P.K. i la posició teòrica de la via (figura 2.3.17.b).



Figura 2.3.17. a) Posicionadora. b) Piquet de via amb les dades per l'anivellació. Extret de [9].

6 - Ajust topogràfic

- Consta de les operacions de correcció en alçat i en planta basant-se en les toleràncies de la taula 2.3.4.
- Amb l'ajuda d'una estació total es determina el valor precís de les correccions a realitzar.
- Mitjançant els fusos i les barres separadores es duu a terme la correcció que s'escau (figura 2.3.18. a i b).

Treball	Paràmetre	Tolerància (mm)	Variacions (mm)
Control previ de formigonat a través de mitjans topogràfics	Anivellació de solera	0 / -50	-
	Ample de via	+2	1,67 mm/m (1mm entre travesses)
	Anivellació absoluta	10	0,37 mm/m (2mm en 5,4m)
	Alineació absoluta	10	0,37 mm/m (2mm en 5,4m)
	Fletxa d'alineació i anivellació (dada presa amb corda de 21,60m cada 5,40m)	2	0,37 mm/m (2mm en 5,4m)
	Peralat	2	0,37 mm/m (2mm en 5,4m)

Taula 2.3.4. Toleràncies geomètriques per a la situació de la via.

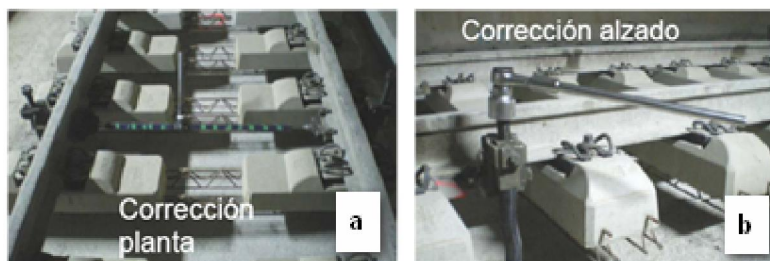


Figura 2.3.18. a) Correccions en planta. b) Correccions en alçat. Extret de [9].

7 - Formigonat de la via

- Una vegada aconseguida la posició definitiva es duu a terme l'armat de la llosa superior en les zones de les boques, degut als canvis bruscos de temperatura, amb les següents quanties (figura 2.3.19.a i b):
 - § Armadura longitudinal: 20 20 mm.
 - § Armadura transversal: 1 20 de 2,70m de longitud, cada 60 centímetres (entre travesses).
 - § Solapament de barres: 1,20m. Com a mínim 3 de les barres hauran d'estar soldades.
- A la llosa de la zona interior del túnel s'hi pot substituir l'armat per fibres de polipropilè amb una dosificació de 900gr/m³.
- Sense retirar els fusos es procedeix al formigonat de la llosa superior de 24 centímetres de gruix, mitjançant reg entre les travesses acompanyat d'un bon vibrat.
- Cada 9 travesses es situa una junta de fisuració (figura 2.3.19.c)
- Quan ha endurit el formigó al cap de 4 hores es procedeix a retirar els fusos i deslligar algunes subjeccions per permetre l'alliberació de tensions.
- A més a més cada 100 metres de via (com a màxim) s'instal·la una presa de terra en cas de possibles descàrregues elèctriques.
- Connectors en les últimes 10 travesses.

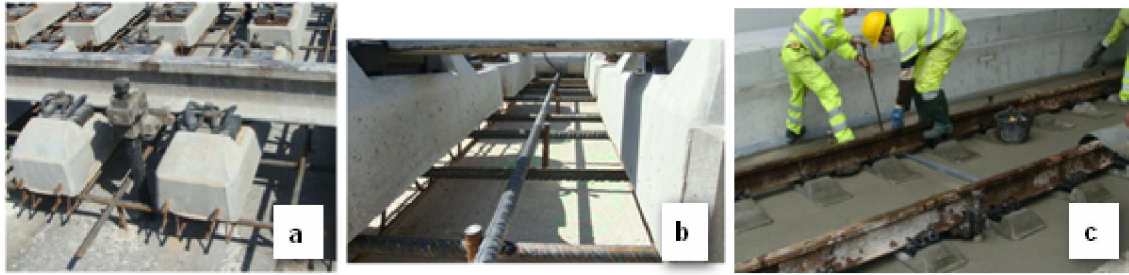


Figura 2.3.19. a) Armat de la placa b) Armadura transversal de la llosa superior. c) Junta transversal de fisuració. Extret de [9].

8- Soldadures aluminotèrmiques

Els carrils es col·loquen amb les juntes centrades entre dos travesses per tal de permetre la soldadura sense haver de moure les travesses.

- La soldadura aluminotèrmica (figura 2.3.20) consisteix en vesar sobre un motlle, que rodeja els extrems dels carrils a soldar, un metall fos obtingut per reacció aluminotèrmica que és fortament exotèrmica.
- Aquest tipus de soldadura té una cala de $23 \pm 2\text{mm}$ i com a màxim es poden realitzar 3 soldadures seguides, de forma que la barra per alliberar sigui de 1080 metres (4 barres de 270 metres).



Figura 2.3.20. Soldadura aluminotèrmica dels carrils. Extret de [9].

2.3.7. Secció tipus

Una vegada definida la via en placa ja es pot analitzar la secció tipus. En aquest apartat s'agafa com a referència la corresponent al model Rheda2000 (figura 2.3.21) donat que és el que es considera per a l'anàlisi posterior de la transició.

En aquests moments no existeix una normativa específica a nivell estatal sobre les vies en placa. Donat que els resultats del tram d'assaig Castelló – Oropesa en el moment de redacció de la present tesina encara no s'han publicat, es desconeix si per les necessitats de les línies espanyoles els gruixos de capes i les propietats dels materials són suficients. El catàleg comercial de l'empresa Rail.One [11], subministradora de la placa Rheda2000, refereix les exigències de la placa a la normativa corresponent que en el seu cas és l'alemanya. En el túnel de Guadarrama, línia Madrid – Segovia, va ser el primer tram a nivell estatal on es va instal·lar via sobre placa en alta velocitat seguint les prescripcions de la normativa alemanya.

Segons aquesta normativa sobre la plataforma en la qual s'hi instal·larà la placa primer és necessari dipositar-hi una capa aïllant contra el gel de 50 centímetres de gruix per a

trams a cel obert. Com ja s'ha explicat prèviament en túnels no és necessària donat que les temperatures no experimenten canvis tan bruscs. Al damunt d'aquesta capa s'executa la llosa inferior, de 30 centímetres, d'aglomerat hidràulic amb una resistència de 20 N/mm^2 . La normativa alemanya per la seva part estableix que com a mínim la resistència sigui de 15 N/mm^2 . Per controlar la fisuració s'entalla cada 5 metres transversalment a la traça longitudinal.

El que seria l'engraellat de via format per travessa, subjeccions i carril es recolza sobre aquesta llosa inferior gràcies a l'armadura. Aquesta per la seva part conforma el que seria el nucli de la placa de 24 centímetres de gruix. Per una banda la gelosia uneix les travesses bibloc B355 atorgant un comportament monolític al conjunt. Donat que l'ample de fisures es limita a 0,5mm com a màxim, es col·loca armadura longitudinal amb una quantia de 20 20mm al llarg de la traça i una quantia transversal de 1 20mm de 2,70 metres de llarg i una separació de 60 centímetres. L'armadura queda així protegida contra la corrosió i es conserva l'efecte de l'ancoratge de l'armadura com a unió entre les plaques prèviament fisurades. Aquesta armadura que no pertany a la travessa serveix per garantir la unió de les travesses a la llosa de formigó.

Com ja s'ha comentat el peralt, en cas que sigui necessari, el dona un augment de gruix de la capa inferior d'aglomerat hidràulic. Atès que el formigó té un mòdul d'elasticitat molt més elevat que l'òptim en vies d'alta velocitat, per disminuir la rigidesa del conjunt les subjeccions són l'element sobre el qual s'actua. En el cas particular del model Rheda2000 s'empra la subjecció loarv 301 que atorga una elasticitat a la placa de $22,5 \text{ KN/mm}$.

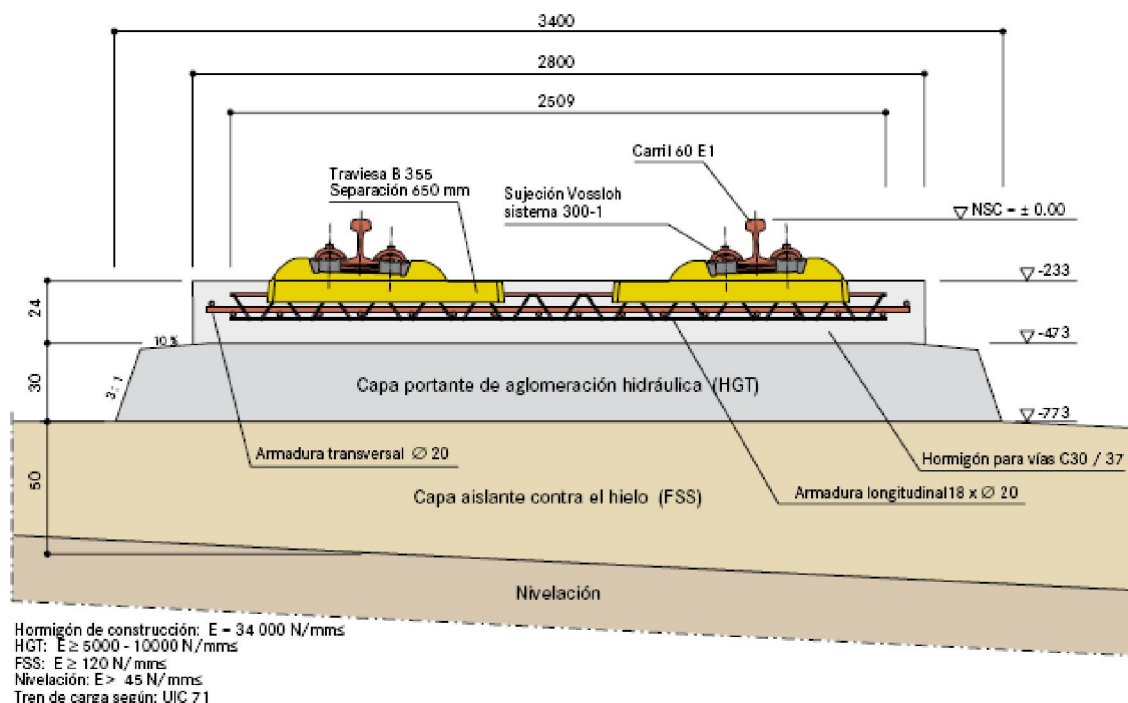


Figura 2.3.21. Detall de la secció transversal de la Rheda2000, extret de [11].

2.4. Conclusions CAPÍTOL 2

En aquest capítol s'ha fet una introducció dels elements que pertanyen al conjunt de la infraestructura d'una línia d'alta velocitat. Per una part els que corresponen a la via sobre balast i per l'altra als que corresponen a la via en placa.

En l'apartat 2.1 s'ha explicat breument quines són les parts que conformen una via de balast, tan de la infraestructura com de la superestructura. A continuació es comenta que s'entén com a qualitat geomètrica d'una via i quins són els factors que la defineixen. Seguidament es defineix quina serà la càrrega tipus per a les vies d'alta velocitat i com afecten les irregularitats del material i la velocitat.

En el següent punt s'aprofundeix en la via sobre balast, quins són elements més rellevants, el seu procés de construcció, avantatges i desavantatges que presenta i quina és la seva secció tipus.

Finalment en l'apartat 2.3 s'explica la via en placa, els seu orígens, les tipologies que existeixen avui en dia en el mercat, els components del sistema, avantatges i desavantatges, el procés d'execució i per últim la seva secció tipus.

Així doncs, l'ús de la via en placa queda plenament justificat, valorant criteris econòmics, en el cas de línies que tinguin un nivell de servei molt elevat perquè es garanteix la qualitat geomètrica de la via amb un manteniment molt inferior, en trams de túnel i viaductes perquè es redueix l'altura de construcció de la secció tipus i també el pes, i en línies on la velocitat de circulació sigui superior als 330 km/h ja que s'evita el fenomen de la volada del balast.

Degut a l'absència d'una normativa concreta per a la via en placa, s'han d'aplicar les disposicions relatives a la instrucció de formigó, és a dir, la EHE-08 en les parts de la via que estiguin compostes per aquest element. Per tant s'ha de complir la quantia mínima d'armadura en les lloses i s'ha de limitar l'ample màxim de fisura segons l'actual normativa espanyola.

CAPÍTOL 3. ESTUDI DE LA TRANSICIÓ

En el següent capítol es descriu com es realitza la transició de via balast a via en placa. Agafant com a exemple a seguir la transició realitzada en els túnels de Guadarrama s'obté la longitud necessària per a cada velocitat. A continuació s'explica quin és el comportament estructural de la via en placa per tal de poder dur a terme l'anàlisi de la transició mitjançant un programa informàtic.

3.1. Transició via de balast – via en placa

En la present tesina el punt de partida sobre el qual es vol obtenir resultats per tal de poder comparar ambdós sistemes de via és la plataforma. Degut a la diferent rigidesa dels materials emprats els esforços sol·licitants sobre la plataforma són diferents en un o altre cas. Per aquest motiu les zones de transició tenen una vital importància ja que de la mateixa manera que les sol·licitacions arriben diferent sobre la plataforma també els efectes sobre els carrils són diferents influïent de manera directa a la qualitat de la via.

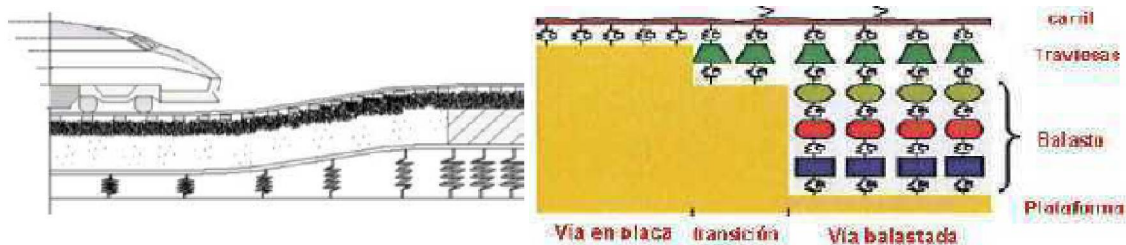


Figura 3.1.1. a) Esquema de transició, s'observa les 3 etapes d'adaptació de la rigidesa. b) Comparació entre un sistema elàstic multicapa (balast) i un sistema amb només 1 nivell d'elasticitat. Extret de [10].

3.1.1. Secció longitudinal de la transició

Com ja s'ha comentat prèviament la transició d'una tipologia de via a una altra ha de ser el més gradual possible per interferir el mínim en la qualitat de la via. Donat que no hi ha una normativa concreta, en la present tesina es segueixen dos tipus de recomanacions en funció de la font alhora de dimensionar les transicions.

(i) Recomancions extretes de [10]:

- Evitar realitzar les transicions placa - balast sobre transicions de infraestructura.
- Adaptació de la rigidesa en 3 etapes, en una longitud total de $L[m] = 1/2V [m/s]$.
- Evitar el balast encolat.
- Instal·lar carrils suplementaris per millorar el repartiment de càrregues.

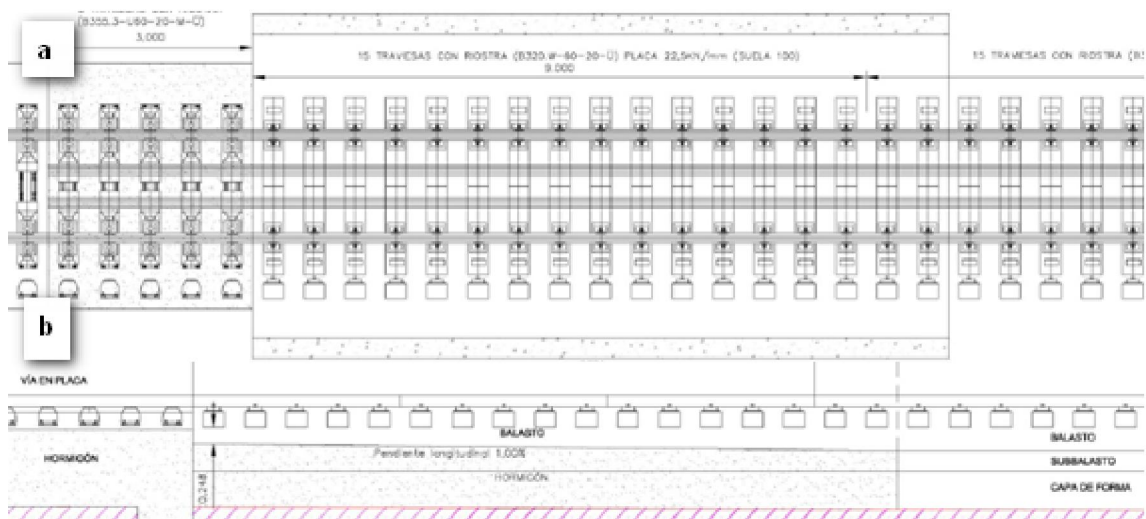


Figura 3.1.2. a) Vista en planta d'una transició segons [10], es pot observar els carrils suplementaris i els murs que confinen el balast. b) Secció longitudinal d'una transició, a l'esquerra la via en placa i la dreta la via sobre balast, s'observa el mur que delimita la placa, l'artesa en si i la secció de via sobre balast. Extret de [9].

(ii) Recomanacions extretes de [17]:

- Aquesta zona de transició abastarà una longitud mínima de $0,4 \cdot V$ (en metres), sent V la velocitat del tram en km/h.
- En aquesta zona no s'hauran de fer encreuaments transversals a la via per a conduccions.
- Aglutinar o estabilitzar el balast immediatament contigu a la via formigonada amb resines sintètiques o lligants.
- Instal·lar una falca asfàltica composta per 3 capes superposades de longitud l , $2/3 l$ i $1/3 l$ sobre la plataforma, essent $l = 0,4 V$
- Instal·lar travesses especials -més llargues- distanciades 0,56m, augmentant gradualment fins a reprendre els 60 cm de separació al final de la zona de transició, definida per la fórmula $0,4 V$ abans assenyalada, on s'ubiquen les travesses convencionals.
- L'última soldadura ha d'estar almenys a 4 metres de la zona formigonada, i la primera soldadura de la via sobre balast almenys a 12 metres del final de la via en placa.
- Així mateix, les cares laterals de l'última travessa formigonada i de la primera travessa sobre balast hauran d'estar a 150 i 200 mm respectivament del final de la placa de formigó.

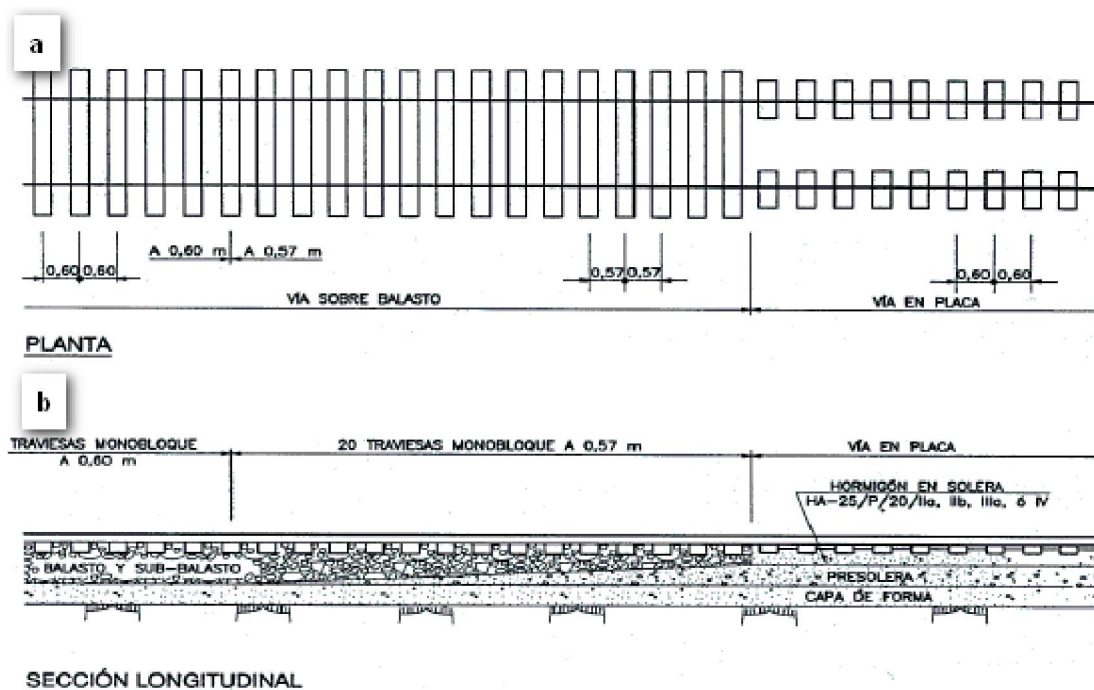


Figura 3.1.3. a) Vista d'una transició segons les indicacions de [17]. S'observa com es disminueix la distància entre travesses. b) Perfil longitudinal, en aquest cas s'observa com la falca per aquest cas concret avarca 20 travesses, que correspon a 11,4 metres de longitud.

Existeixen diverses maneres per fer les transicions, en general però, es poden diferenciar les actuacions en funció de si pertanyen a la infraestructura de la via o a la superestructura.

Atès que la longitud de les transicions ve determinada per la velocitat de circulació, seguint les recomanacions explicades en [10] i [17], en la següent taula 3.1.1 es mostra per cada velocitat la longitud que seria necessària. A més a més considerant una separació de 60 centímetres entre elles, es mostra el número de travesses aproximat que composarien el conjunt de la transició i per tant, sobre les quals s'hauria d'actuar.

V (km/h)	V (m/s)	$L_T (m) = \frac{1}{2} V(m/s)$	Travesses	$L_T (m) = 0,4 V(km/h)$	Travesses
200	55,56	27,77	47	80	134
250	69,44	34,72	58	100	167
300	83,33	41,66	70	120	200
350	97,22	48,61	81	140	234

Taula 3.1.1. Longituds de transició en funció de la velocitat de pas i nombre de travesses afectades.

D'aquesta taula es conclou que una vegada projectada la zona de transició no es pot incrementar la velocitat de circulació sense realitzar les pertinents actuacions sobre la via. Com a exemple comentar que en els túnels de Guadarrama, la velocitat de circulació en les boques del túnel és de 250 km/h, que són els punts on hi ha les transicions d'un tipus de via a un altre.

La zona de transició es considera que comença a 3,00 metres del final de la via en placa. A partir d'aquest punt, que comprèn les 5 últimes travesses, es delimita el punt final on acaba la transició i comença la via de balast convencional.

La recomanació de que la longitud de la transició no sigui inferior a 0,4 cops la velocitat, és per als casos en els quals no s'utilitza una placa d'assentament diferent ni soles sota travessa. Únicament com ja s'ha comentat s'empren travesses especials de tipus desviament. Per tant, aquest tipus de transició seria més adequat per a vies de caràcter urbà en les quals les velocitats comercials són molt inferiors a les d'alta velocitat. Com a exemple, per a una velocitat de 50 km/h es necessitarien 20 metres per a la realització de la transició. Per aquest motiu a partir d'aquest punt es considera com a metodologia més adequada la proposada en [10].

3.1.1.1. Actuacions sobre la infraestructura

En el primer cas el primer obstacle a salvar és la diferència de gruix que presenta cada tipus de via. La via Rheda 2000 té un espessor de 0,493 a 0,540 metres i en la via de balast el gruix és variable des dels 0,771 als 0,95 metres. Per salvar aquesta diferència de cotes es construeix una artesa que uneix la cota inferior de la via en placa amb la cota inferior de la capa de balast. La longitud de l'artesa és variable en funció de la velocitat de projecte de la via i d'altres factors com la presència de viaductes o aparells de desviament en zones properes, però en general l'artesa ha d'abastar en total 15 travesses. En l'inici d'aquesta es construeix un mur d'1 metre d'amplada que delimita el final de la llosa inferior de la via en placa (figura 3.1.2.a).

L'artesa a més a més funciona com a llosa inferior permetin una transició gradual dels gruixos de formigó i balast que hi ha sota la via, és a dir, en l'inici de l'artesa el gruix de balast és aproximadament de 25 centímetres i al final de la mateixa és de 35 (sota travessa). Això s'aconsegueix donant una inclinació del 1,00% a la cara superior de l'artesa. Per la part que li correspon el gruix de formigó de l'artesa varia des dels 60 centímetres en el punt més proper a la via en placa fins als 45 – 50 centímetres quan entra en contacte amb el subbalast.

Per confinar el balast l'artesa s'acompanya per uns murets a banda i banda de cada via i situats a 37 centímetres de cada carril. El mur de la part exterior és desmuntable per facilitar les operacions de manteniment i funciona com un encofrat. El mur interior és de formigó i té un gruix de 20 centímetres. És important que el balast estigui confinat el màxim possible per evitar d'encolar-lo, ja que és millor per les operacions de manteniment.

3.1.1.2. Actuacions sobre la superestructura

Així com les actuacions en l'apartat inferior estaven relacionades amb el balast i la plataforma, en aquest apartat estan relacionades amb els carrils i travesses.

Per garantir una variació gradual de la rigidesa s'actua sobre els següents elements:

- *Carrils:* es situen carrils addicionals en la part central de manera que actuïn com si fossin una riostra.
- *Subjeccions:* la placa d'assentament té diferent elasticitat per a la via en placa i balast.

- *Travessa:* per la transició es poden utilitzar travesses per a desviaments o bé disminuir la distància entre aquestes als 55 centímetres.
- *Sola sota travessa:* amb tres tipus diferents de rigidesa es permet una variació gradual.

D'aquests quatre components, les subjeccions i les soles sota travessa són el que tenen un paper més important alhora d'aconseguir aquesta variació progressiva de la rigidesa ja que són els elements més elàstics de l'engraellat de la via.

Seguint l'exemple del túnel de Guadarrama, per a les transicions es van utilitzar plaques d'assentament amb rigideses de 22,5 kN/mm i 27,5 kN/mm i tres tipus diferents de soles: de 100, 170 i 240 kN/mm.

3.1.2. Túnel de Guadarrama

La primera vegada que es va col·locar via en placa a l'estat espanyol en vies d'alta velocitat i en trams que no fossin urbans, va ser a línia Madrid – Valladolid. En aquest tram, per superar el sistema central i arribar a la meseta nord va ser necessària la construcció d'un túnel de més de 28 quilòmetres de llarg que superés aquest accident geogràfic. Les obres van començar el setembre del 2002 i van tenir una durada de 32 mesos. El diàmetre de l'excavació va ser de 9,45 metres, fet que va proporcionar un diàmetre interior útil de 8,5 metres. La distància entre els dos túnels és de 30 metres.



Figura 3.1.4. a) Ubicació del túnel que travessa la Sierra de Guara, a cavall entre Madrid i Segovia. Extret de [10]. b) Imatge de l'interior del túnel ja finalitzat. Extret de [19].

En aquest tram existeixen dues zones de transició, una a la boca nord i una altra a la sud. A més a més tenen la particularitat que en el primer cas, just després de la transició, hi ha un desviament de vies corresponent a l'estació de Segòvia i en el segon, un aparell de dil·latació. Per aquests motius les transicions d'aquest túnel es poden considerar com a especials. A continuació es mostren com estan compostes, tenint en compte que van ser projectades per a una velocitat de sortida del túnel de 250 km/h.

a	VIA IZQUIERDA Y DERECHA	
	DISTANCIA (m)	UNIDADES TRAVIESAS
5 TRAVIESAS CON RIOSTRA (B355.3-U60-20-M-U)	3,0	5
15 TRAVIESAS CON RIOSTRA (B320.W-60-20-U) PLACA 22,5KN/mm (SUELA 100)	9,0	15
15 TRAVIESAS CON RIOSTRA (B320.W-60-20-U) PLACA 22,5KN/mm (SUELA 170)	9,0	15
13 TRAVIESAS SIN RIOSTRA TIPO DESVIO PLACA 27,5KN/mm (SUELA 240)	7,8	13
TRAVIESAS SIN RIOSTRA TIPO DESVIO PLACA 27,5KN/mm (SIN SUELA)	8,4	14
TRAVIESAS SIN RIOSTRA TIPO DESVIO PLACA 22,5KN/mm (SIN SUELA)	Hasta el aparato de via	

b	VIA IZQUIERDA Y DERECHA	
	DISTANCIA (m)	UNIDADES TRAVIESAS
5 TRAVIESAS CON RIOSTRA (B355.3-U60-20-M-U)	3,0	5
15 TRAVIESAS CON RIOSTRA (B320.W-60-20-U) PLACA 22,5KN/mm (SUELA 100)	9,0	15
15 TRAVIESAS CON RIOSTRA (B320.W-60-20-U) PLACA 22,5KN/mm (SUELA 170)	9,0	15
13 TRAVIESAS SIN RIOSTRA TIPO DESVIO PLACA 27,5KN/mm (SUELA 240)	7,8	13
TRAVIESAS SIN RIOSTRA TIPO DESVIO PLACA 27,5KN/mm (SIN SUELA)	Hasta el aparato de dilatación	

Figura 3.1.5. a) Elements de la boca nord. b) Elements de la boca sud. Extret de [10].

Com es desprèn de la figura 3.1.5 degut a les particularitats de les zones contigües al túnel les longituds de transició difereixen de forma sensible, 37,2 metres per la boca nord i 28,8 per a la boca sud. Si es comparen aquests dos valors amb el corresponent a la recomanació de projectar transicions amb una longitud de valor la meitat de la velocitat en m/s, s'obté que pels 34,72 metres recomanats en la boca nord es compleix perfectament però no el boca sud. A nivell de travesses, a la boca nord el total d'afectades és de 62 per 48 a la boca sud i la recomanació seria d'unes 57.

En general però, en ambdós casos es procedeix a utilitzar la mateixa metodologia per obtenir una variació de la rigidesa gradual a nivell de superestructura. És a dir, per a l'execució de la transició s'utilitzen 2 tipus diferents de placa d'assentament, 3 tipus de soles sota travessa i 2 tipus de travesses.

3.1.3. Dimensions de cada zona de la transició

Per determinar la llargada de cada element es defineix aquest en funció de la longitud de l'artesa. A mode de referència, s'utilitzen les transicions del túnel de Guadarrama com a exemple a seguir. En aquest cas la llargada de l'artesa és aproximadament un 25 – 30% del total de la transició.

En un tram longitudinal es poden diferenciar 4 zones (figura 3.1.6):

- Zona via en placa.
- Zona de l'artesa.
- Zona contigua a l'artesa.
- Zona de balast.

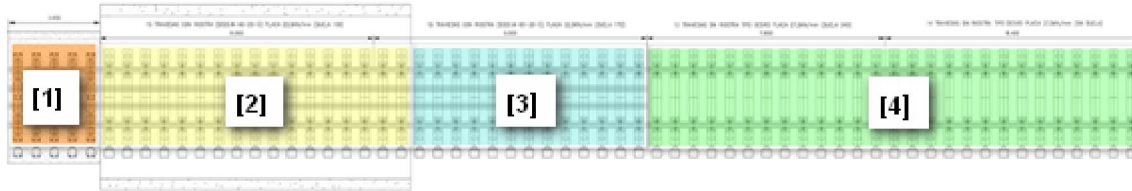


Figura 3.1.6. Diferenciació dels trams, [1] taronja: via en placa, [2] groc: artesa, [3] cian: zona contigua i [4] en verd: zona balast.

A continuació es defineix cada una d'aquestes zones en funció de les indicacions proposades en [10] on a cada una se li assigna una longitud L_i en funció del punt on pertanyi. La longitud total de la transició (3.1) s'obté de la suma de cadascuna d'elles.

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 \quad (3.1)$$

- *Zona via en placa (L_1)*

L'afectació sobre la via en placa només es produeix en una longitud de 3 metres. Aquesta longitud es manté constant independentment de la velocitat de projecte de la transició donat que la única actuació que s'hi realitza és la col·locació de la riostra, a mode de carrils addicionals, que afecta 5 travesses de la via en placa.

$$L_1 = 3 \text{ (m)} \quad (3.2)$$

- *Zona de l'artesa (L_2)*

La longitud d'aquest tram és el paràmetre a partir del qual es determina la llarga de la resta de zones. En l'exemple del túnel de Guadarrama aquesta longitud és del 24% del total en la boca nord i del 30% en la boca sud. Atès que en ambdós casos la dimensió total de la transició és superior i inferior respectivament respecte a la longitud recomanada, es fa la hipòtesis d'agafar un percentatge intermig de la llargada total de l'ordre del 27% de la longitud total de la transició.

$$L_2 = 0,27 \cdot L_T \quad (3.3)$$

- *Zona contigua a l'artesa (L_3)*

Aquesta zona té una longitud igual a la de l'artesa menys dues travesses (1,2 metres). Es tracta del tram que defineix l'inici de la via en balast i a més a més, el seu punt final coincideix amb el final de la riostra.

$$L_3 = 0,27 \cdot L_T - 1,2 \text{ m} \quad (3.4)$$

- *Zona de balast (L_4)*

La longitud del tram amb secció de balast s'obté restant a la longitud total la suma de les corresponents a la via en placa, l'artesa i la zona contigua a aquesta. En aquest tram la secció transversal de la via ja és la típica d'una via de balast per l'alta velocitat.

$$L_4 = L_T - (L_1 + L_2 + L_3) \quad (3.5)$$

Una vegada determinada la longitud genèrica de cada tram ja es pot determinar en funció de la velocitat les dimensions concretes.

V (km/h)	L ₁ (m)	L ₂ (m)	L ₃ (m)	L ₄ (m)	L _T (m)
200	3	7,50	6,3	10,97	27,77
250	3	9,37	8,17	14,18	34,72
300	3	11,25	10,05	17,36	41,66
350	3	13,12	11,92	20,57	48,61
200	-	-	-	-	80
250	-	-	-	-	100
300	-	-	-	-	120
350	-	-	-	-	140

Taula 3.1.2. Dimensions de cada tram de la transició en funció de la velocitat i mètode emprat. Elaboració pròpia.

Les dimensions anteriors comptabilitzades com a nombre de travesses afectades per cada tram són les de la taula següent. En aquest cas s'ha tingut en compte que no varia la distància entre les travesses i es manté constant a 60 centímetres en la totalitat de la transició.

V (km/h)	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	Travesses
200	5	13	11	18	47
250	5	16	14	23	58
300	5	19	17	29	70
350	5	22	20	34	81
200	-	-	-	-	134
250	-	-	-	-	167
300	-	-	-	-	200
350	-	-	-	-	234

Taula 3.1.3. Afectació de travesses de cada tram en funció de la velocitat i mètode emprat. Elaboració pròpia.

El fet de definir cada tram en funció de les travesses dóna una idea més concisa ja que es treballa en nombres enters i permet una quantificació més pràctica de les afectacions, ja que cada element de la superestructura està relacionat amb la corresponent travessa.

3.1.4. Procés constructiu de la transició

El procés constructiu de la transició comprèn característiques pròpies de la via de balast i de la via en placa. A continuació es resumeixen els passos principals de la seva execució.

1 - Per marcar el final del tram de via en placa és necessari construir un dau d'1 metre d'amplada i amb una profunditat de 0,75 metres respecte la cara inferior de la llosa. A partir d'aquest dau - figura 3.1.7.a - comença el tram de l'artesa de formigó, amb un gruix de 60 centímetres en el seu inici i 45 quan entra en contacte amb el balast.



Figura 3.1.7. a) Detall del dau del final de la placa i inici de l'artesa. b). A la dreta mur de formigó ja executat i a l'esquerra suports per al muret exterior. Extret de [9].

2 - A continuació s'executen els murs que serveixen per confinar el balast. Es construeixen 2 murs per cada via, un d'interior i un altre exterior. Els murs que queden en la zona d'entrevia s'executen amb formigó i els exteriors són desmuntables i de fusta (figura 3.1.8).



Figura 3.1.8. a) La fletxa assenyala els murets exteriors desmuntables.

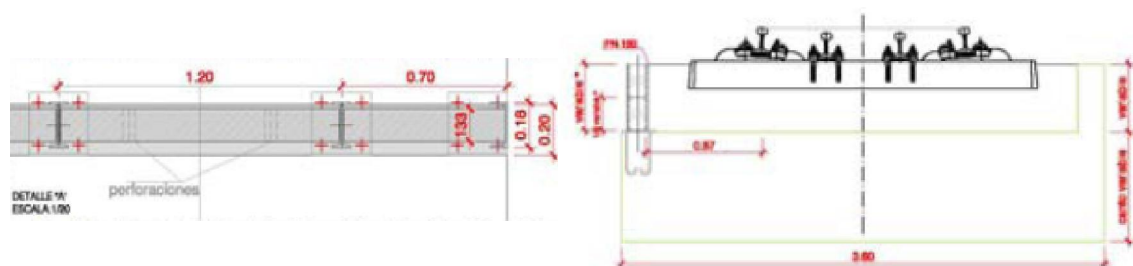


Figura 3.1.9. a) Planta del mur exterior. b) Alçat del tram de via confinat entre els murs. Extret de [9].

3 - Quan està finalitzada la infraestructura es munten els elements superestructurals seguint la metodologia característica de la via de balast i la via en placa respectivament (figura 3.1.10.a i b).



Figura 3.1.10. a) Vista en planta de la transició després d'abocar balast. b) Tram de transició finalitzat. Extret de [10].

4 - Una vegada col·locats els carrils es procedeix a abocar el balast i realitzar les anivellacions corresponents. Finalment es col·loquen els carrils interiors que uneixen la part de via en placa amb la de balast (figura 3.1.11).



Figura 3.1.11. Transició finalitzada. Extret de [9].

3.2. Funcionament estructural

Per determinar els esforços que produeixen el pas dels vehicles és necessari saber com és el comportament estructural. Per una banda primer cal saber com és la distribució longitudinal sobre les travesses per poder determinar els esforços sobre la llosa i finalment la distribució sobre la plataforma.

La càrrega transmesa per l'eix del vehicle es transmet sobre les travesses segons la distribució de càrregues indicades en:

- Eurocodi 1, part 2: UNE EN 1991-2 (2004) Cargas de Tráfico en Puentes.
- IAPF: Instrucció Sobre las Acciones a Considerar en Puentes de Ferrocarril.

Segons aquestes normatives la distribució sobre les travesses és com la indicada en la figura 3.2.1 en la qual la càrrega per cada eix es reparteix sobre 3 travesses. La meitat de la sol·licitació $Q/2$ (50%) sobre la travessa immediatament inferior i una quarta part $Q/4$ (25%) sobre les travesses contigües.

Per la seva part, la distribució sobre el terreny i els esforços en la llosa es poden analitzar segons la teoria de la biga sobre fundació elàstica.

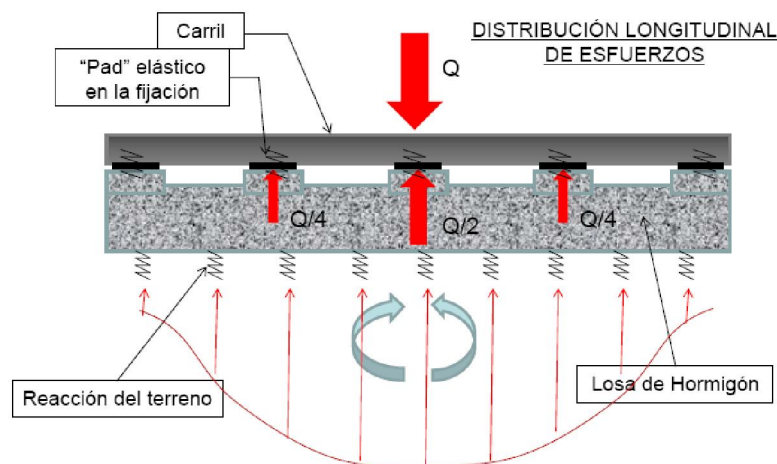


Figura 3.2.1. Esquema de la distribució de càrregues sobre una placa i reacció del terreny. Extret de [10].

Així doncs, tal com en seu moment es va determinar la càrrega que produïa un vehicle tipus per a una velocitat donada sobre cada travessa en una via sobre balast, a continuació es realitza el mateix però tenint en compte que la via és sobre placa.

Cal recordar que l'eix tipus és de 17t i per tant sobre cada roda és de 8,5t. Aleshores, tenint en compte el factor d'ampliació degut a la velocitat, les càrregues per cada roda en funció de la velocitat són les de la taula 3.2.1. Seguint el mateix raonament que en l'apartat 2.1.3.2 (*Àrea d'influència d'una càrrega*) però amb les consideracions pertinents a la via en placa, la distribució d'una càrrega vertical sobre les travesses és la corresponent a taula 3.2.2.

V (Km/h)	Q_E (t)	f(v)	Q_D (t) = $Q_E \cdot f(V)$
200	8,5	1,41	11,99
250	8,5	1,45	12,33
300	8,5	1,49	12,67
350	8,5	1,53	13,01

Taula 3.2.1. Càrregues dinàmiques per a cada velocitat, elaboració pròpia.

Velocitat (Km/h)	Càrrega Q(t)	Càrrega (t) en funció de la posició de la travessa		
		-0,60 (m)	0 (m)	0,60 (m)
0	8,5	2,125	4,25	2,125
200	11,99	2,9975	5,995	2,9975
250	12,33	3,0825	6,165	3,0825
300	12,67	3,1675	6,335	3,1675
350	13,01	3,2525	6,505	3,2525

Taula 3.2.2. Sol·licitacions estàtiques i dinàmiques sobre les travesses afectades, elaboració pròpia.

Si es compara la taula 3.2.2 amb l'anàloga per a via sobre balast (taula 2.1.4) es pot observar com degut a la major elasticitat de la subjecció de la placa, 22,5 kN/mm envers 80 kN/mm, hi ha una menor afectació de travesses. Quantitativament es tracta d'un augment de la càrrega del 25% sobre les travesses immediatament inferiors i del 8,7% sobre les contigües.

3.2.1. Rigidesa de la infraestructura de la transició

Com ja s'ha vist, en les zones en que es produeix el canvi d'un tipus de via a un altre es poden definir tres parts clarament diferenciades a nivell d'infraestructura (figura 3.2.2). Per una banda, de color taronja la corresponent a la via en placa, a continuació, de color groc una zona intermitja en la qual hi ha el balast sobre una artesa de formigó i finalment la zona de via sobre balast representada en verd.

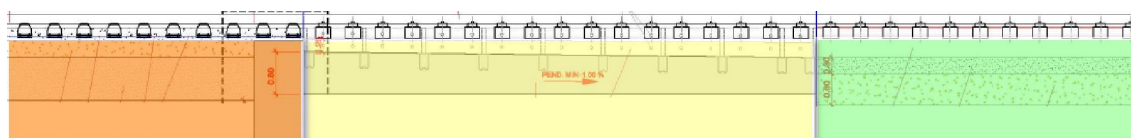


Figura 3.2.2. Diferents zones de la transició. Elaboració pròpia.

Duent a terme una analogia amb el dimensionament de ferms per a carreteres, una zona de transició és aquella que de forma gradual permet el pas d'un ferm rígid (via en placa) a un altre de flexible (via sobre balast) passant per un tram semirígid (tram relatiu a l'artesa). Per tal de poder aplicar les hipòtesis i fórmules per al seu dimensionament es suposa que totes les capes es recolzen sobre un semiespai indefinit de Boussinesq, que en aquest cas es tracta de la plataforma ferroviària.

Atès que s'està estudiant la transició per a línies d'alta velocitat i per tant la plataforma ha de ser d'alta qualitat, es determina que la capacitat portant d'aquesta és de 120 MPa.

3.2.1.1. Mètode de Winkler

Un dels mètodes de càlcul més utilitzats per modelitzar la interacció entre estructures i el terreny és el que suposa el sòl com un equivalent a un nombre infinit de molles elàstiques on cadascuna té una rigidesa corresponent al seu mòdel de balast. Segons el mètode de Winkler la relació entre la pressió de contacte (q) i el desplaçament (δ), en aquest cas assentament, és la donada per la fórmula 3.6.

$$K = \frac{q}{\delta} \text{ [kN/mm]} \quad (3.6)$$

El comportament estructural d'aquest mètode de càlcul és el corresponent a la següent figura:

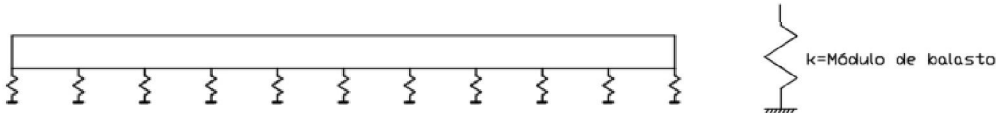


Figura 3.2.3. Representació del mètode del Balast. Extret de [12].

Aquest sistema estructural és exactament el corresponent a l'engraellat d'una via, en el qual el carril està representat per una biga i el conjunt de capes que formen la infraestructura per un nombre infinit de molles de rigidesa " K ". Una altra forma de caracteritzar la rigidesa és mitjançant el coeficient de balast " c ".

3.2.1.2. Característiques mecàniques dels materials i condicions de contorn

Per poder realitzar el càlcul de la rigidesa de la infraestructura en cada tram de via primer de tot és necessari conèixer quina és la rigidesa dels elements estructurals que hi ha a cada punt. Les propietats que defineixen cada material venen determinades pels següents paràmetres:

- *Mòdul de Young (E):* caracteritza el comportament elàstic segons la direcció en que s'aplica la força.
- *Coefficient de Poisson (ν):* és una constant elàstica que proporciona una mesura de l'estretament d'una secció prismàtica, d'un material elàstic lineal i isòtrop, quan s'estira longitudinalment i s'encongeix en la direcció perpendicular a l'estirament.
- *Densitat (ρ):* magnitud referida a la quantitat de massa per unitat de volum.
- *Cohesió (C):* és la qualitat per la qual les partícules del terreny es mantenen unides en virtut de forces internes.
- *Angle de fricció (ϕ):* és l'angle que forma una pila de material granular en repòs.
- *Rigidesa vertical (K):* és la capacitat d'un objecte de suportar esforços sense deformar-se en excés.
- *Coefficient de balast (c):* és l'assentament que es produeix per l'acció d'una pressió.

En la taula 3.2.3 es resumeixen les propietats esmentades dels principals materials utilitzats per a la construcció de vies de ferrocarril.

Material	E (MPa)		(kg/m ³)	K (kN/mm)	c (N/mm ³)
Balast	110, 150-270	0,20	1280 - 1800	45	
Subbalast	200	0,20	1800	65	
Grava	69 - 175	0,15 – 0,35	1700		
Arena	17 - 27	0,25 – 0,40	1800		
Plataforma	120	0,2	-	0,6667 kN/mm ²	0,10-0,15
Formigó	29780	0,20	2500	16,54 kN/mm ²	0,12-0,14

Taula 3.2.3. Característiques elàstiques de cada material. Valors extrets de [13] i [16].

Material	(kg/m ³)	C (MPa)	(graus)
Balast	1280 - 1800	0,0001	45
Subbalast	1800	0,0001	45
Grava	1700-2000	0,0001	35
Arena	1800-2000	0,0001	32

Taula 3.2.4. Característiques dels materials granulars. Valors extrets de [1], [13] i [16]

- *Mòdul d'elasticitat confinat (E_m)*, es tracta del mòdul d'elasticitat quan un material té els moviments sobre els eixos horitzontals molt limitats o pràcticament nuls. Aquest cas és el corresponent a la zona de l'artesa en la qual el moviment lateral del balast està limitat pels murs exteriors i el moviment longitudinal pel cap de la via en placa.

$$E_m = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.7)$$

Pel cas concret del balast, si s'aplica la fórmula 3.7, extreta de [15], el valor que s'obté del mòdul confinat és el següent:

Material	E_m (MPa)	
Balast	122	0,2

Si es fa la hipòtesis que en tots els casos es tracta de materials homogenis, isotròpics i lineals, llavors el valor de la rigidesa per elements en forma de barra es pot obtenir a partir de la fórmula 3.8.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (3.8)$$

Per simplificar els càlculs es suposa que tots els materials tenen aquest comportament homogeni, isotròpic i lineal, de manera que per a tots els casos es pugui aplicar la fórmula 3.8.

En el cas que s'estigui estudiant el comportament d'una llosa, pel cas d'una placa prima de gruix constant (model de Love – Kircchoff) l'única rigidesa rellevant és la relativa a les deformacions provocades per la flexió sota una càrrega perpendicular. Aquesta rigidesa es coneix com a rigidesa flexional de plaques i ve donada per la

fórmula (3.9) on E és el mòdul de Young, ν el coeficient de Poisson i h l'espessor de la placa.

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (3.9)$$

3.2.1.3. Rigidesa vertical de cada tram de la infraestructura

A partir de les fórmules i teories definides en els apartats previs i aplicant la teoria del coeficient de rigidesa del recolzament, que s'explica en apartats posteriors, es pot obtenir la rigidesa vertical específica de cada tram definit prèviament.

- Rigidesa de la placa

En la secció de via en placa hi ha dues capes de formigó, per una part la solera inferior i al damunt el que seria la placa en si. En total doncs, seria una capa de 30 centímetres de gruix més una de 24. Per simplificar els càlculs es suposa que les dues capes treballen monolíticament de tal manera que en total hi ha una capa de 54 centímetres de gruix que es recolza sobre la plataforma. Si s'aplica la fórmula 3.10 i els paràmetres de la taula 3.2.3 s'obté la rigidesa del tram de via en placa:

Capes	Gruix (cm)	K (kN/mm)	Rigidesa equivalent
Formigó	24		$K_{eq} = 120 - 150 \text{ kN/mm}$ $c = 0,60 \text{ N/mm}^3$
Formigó	30		

- Rigidesa de l'artesa

En aquest tram la rigidesa ve donada per la l'artesa, entesa com una capa de formigó de gruix constant de 55 centímetres, i una capa de balast que també es considera constant de 30 centímetres.

Capes	Gruix (cm)	K (kN/mm)	Rigidesa equivalent
Balast	30	45	$K_{eq} = 110 - 120 \text{ kN/mm}$ $c = 0,40 - 0,50 \text{ N/mm}^3$
Formigó	55		

- Rigidesa del sistema balast - plataforma

En la secció de balast els gruixos de capes estan formats per 35 cm de balast, 25 de subbalast, 20 de grava i finalment 15 d'arena. Aquest conjunt de capes descansen sobre la plataforma que com ja s'ha comentat es considera com un semiespai de Boussinesq, amb una elasticitat de 120 MPa. Donat que es tracta de vies d'alta qualitat els valors de rigidesa vertical del sistema balast – plataforma recomanats en [1] en aquests casos, oscil·len entre els 70 kN/mm i els 110 kN/mm.

Capes	Gruix (cm)	K (kN/mm)	Rigidesa equivalent
Balast	35	45	$K_{eq} = 70 - 110 \text{ kN/mm}$ $c = 0,30 - 0,40 \text{ N/mm}^3$
Subbalast	25	65	
Grava	20		
Arena	15		

Una vegada aconseguides les dades relatives a cada zona, ja es pot assignar a cada punt de la transició la rigidesa relativa als elements infraestructurals.

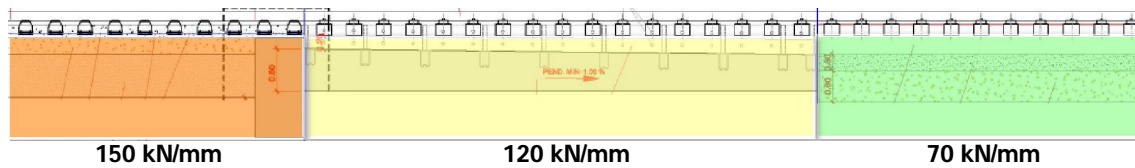


Figura 3.2.4. Rigidesa vertical de cada tram de la transició. Elaboració pròpia.

Com es pot observar en la representació gràfica, la variació de rigidesa del tram de la placa a l'artesa disminueix en un 20%. A continuació entre el tram de l'artesa i del balast la disminució és del 42% entre elles. Llavors la diferència de rigidesa de la via de balast sobre la via en placa és d'uns 80 kN/mm, que representa un 66% aproximadament.

Per ajudar a una variació més gradual es procedeix a les actuacions descrites anteriorment que es realitzen sobre els carrils i travesses, que es descriuen en el següent apartat.

3.2.2. Rigidesa de la superestructura de la transició

Seguint el mateix raonament que en l'apartat anterior es determina per a cada punt de la transició la rigidesa dels elements de la superestructura, en aquest cas intervenen subjeccions i soles sota travessa.

Si es considera que la separació entre travesses roman constant i que només es varia la rigidesa de les subjeccions i soles, prenent com a exemple les transicions realitzades en el túnel de Guadarrama es poden diferenciar els següents punts en funció de cada element.

- Subjecció:

En total s'utilitzen 3 rigideses diferents de la placa d'assentament de 22,5, 27,5 i 80 kN/mm en funció de la proximitat d'un o altre tipus de via. Cal especificar que la subjecció amb rigidesa de 80 kN/mm no afecta a la transició ja que és la corresponent a la via en balast. Es situen de forma que sobre la reducció de la rigidesa sigui gradual, per aquest motiu, el tipus més elàstic va sobre la via en placa i l'artesa i el més rígid sobre el balast. El gruix de la placa d'assentament per a vies d'alta velocitat és de 7mm a l'estat espanyol.

	Placa d'assentament		
Rigidesa (kN/mm)	22,5	27,5	100
Gruix (mm)	7	7	7

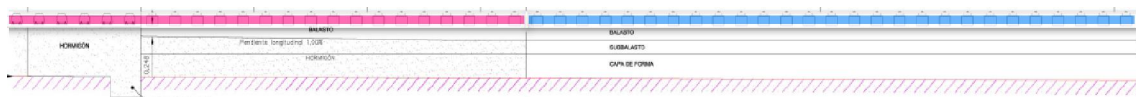


Figura 3.2.5. En magenta, travesses amb subjecció de 22,5 kN/mm. En blau, travesses amb subjecció de 27,5 kN/mm.

- *Sola sota travessa:*

S'empren de 3 rigideses diferents, 100, 170 i 240 kN/mm. Es col·loquen en la zona més intermitja de la transició, des de l'inici de l'artesa fins a la via de balast. Les soles es col·loquen de forma progressiva de manera que com més properes a la via en placa la sola més elàstica és. Com es pot observar en la figura 3.2.6 aquest tipus de sola no es col·loca en les travesses de la via en placa.

	Sola elàstica		
Rigidesa (kN/mm)	100	170	240
Gruix (mm)	9	9	9



Figura 3.2.6. En taronja, travesses amb sola de 100 kN/mm. En groc, travesses amb sola de 170 kN/mm. En verd travesses amb sola de 240 kN/mm.

Per facilitar el càlcul de la rigidesa global, donat que en la superestructura hi ha aquests 2 nivells elàstics a considerar i separats únicament per la travessa, a continuació es calcula quina és la rigidesa conjunta de la placa i la sola corresponent a cada travessa.

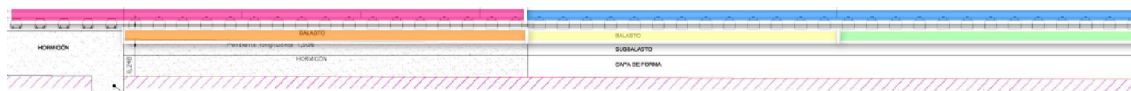


Figura 3.2.7. Superposició dels elements elàstics.

A partir de les zones definides en l'apartat 3.1.3 i de la fórmula 3.10 que s'explica en el següent apartat s'obté per a cada tram la rigidesa corresponent a la superestructura.

	Transició			
Tram	Via en placa	Artesa	Zona contigua	Balast
Rigidesa de la placa (kN/mm)	22,5	22,5	27,5	27,5
Rigidesa de la sola (kN/mm)	-	100	170	240
Rigidesa equivalent (kN/mm)	22,5	18,37	23,67	24,67

Taula 3.2.5. Rigidesa equivalent de la placa d'assentament i la sola sota travessa.

A la vista dels resultats obtinguts es conclou que en el tram de balast la rigidesa creix de forma progressiva amb una diferència màxima de 5 kN/mm, força raonable per les distàncies en que s'està treballant. També cal destacar que en la zona de via en placa la rigidesa superestructural és major que en la de l'artesa. Aquest resultat indica que a posteriori quan es calculi la rigidesa equivalent del conjunt de via la variació serà gradual.

3.2.3. Rigidesa del conjunt de via en cada punt de la transició

3.2.3.1. Teoria del coeficient de rigidesa del recolzament

Al llarg de la història han aparegut diverses formulacions i teories, la finalitat de les quals era l'avaluació de la rigidesa vertical d'una via ferroviària. D'aquesta manera han aparegut teories com la del Coeficient de Balast de Winkler, la de Timoschenko-Saller-Henkel, la del Mòdul de via i la de Coeficient de Rigidesa del recolzament.

Aquesta última estableix un model en el qual la rigidesa global està relacionada amb les rigideses parcials de cada un dels elements que el formen, suposant-los com a elements elàstics, que s'assimilen a un conjunt de molles disposades en paral·lel. És per això que estableix que:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_p} + \frac{1}{K_{pa}} + \frac{1}{K_{trav}} \quad (3.10)$$

K_{eq} : rigidesa vertical de la via.
 K_b : rigidesa vertical del balast.
 K_p : rigidesa vertical de la plataforma.
 K_{pa} : rigidesa vertical de la placa d'assentament.
 K_{trav} : rigidesa vertical de la travessa.

Per una banda, s'observa que la rigidesa de la via i la plataforma són molt superiors a la de la resta d'elements, per aquesta raó, la seva contribució a la rigidesa global és menyspreable. D'altra banda, hi ha el problema de trobar per separat les rigideses del balast i de la plataforma. És per això que la fórmula anterior es modifica i es simplifica com:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{bp}} + \frac{1}{K_{pa}} \rightarrow K_{eq} = \frac{K_{pa} \cdot K_{bp}}{K_{pa} + K_{bp}} \quad (3.11)$$

K_{bp} : rigidesa vertical del sistema balast - plataforma.

No obstant això, els resultats obtinguts experimentalment relacionats amb les rigideses presenten valors molt diferents segons Miralbés i Castejón [18]. Per aquest motiu aquests autors van proposar la següent aproximació matemàtica de la rigidesa vertical de la via, que pretén donar una sèrie de pesos (A i B) a cada una de les rigideses parcials i també magnificar mitjançant la constant "C" el valor de la resta de rigideses que poden contribuir. On aplicant mètodes d'aproximació iteratius van obtenir la següent formulació:

$$K_{eq} = \frac{1}{\frac{A}{K_{bp}} + \frac{B}{K_{pa}} + C} \rightarrow \frac{1}{K_{eq}} = \frac{0,32732}{K_{bp}} + \frac{0,31472}{K_{pa}} + 0,00153 \quad (3.12)$$

3.2.3.2. Comparació dades experimentals amb les dades empíriques

En els següents gràfics es duu a terme una comprovació del mètode proposat pels autors Miralbés i Castejón [18]. Segons els mateixos, les equacions anteriorment exposades són totalment vàlides per a un llindar de rigidesa del sistema balast – plataforma (K_{bp}) igual o superior a 40 kN/mm i una rigidesa de la placa d'assentament (K_{pa}) igual o superior a 60 kN/mm.

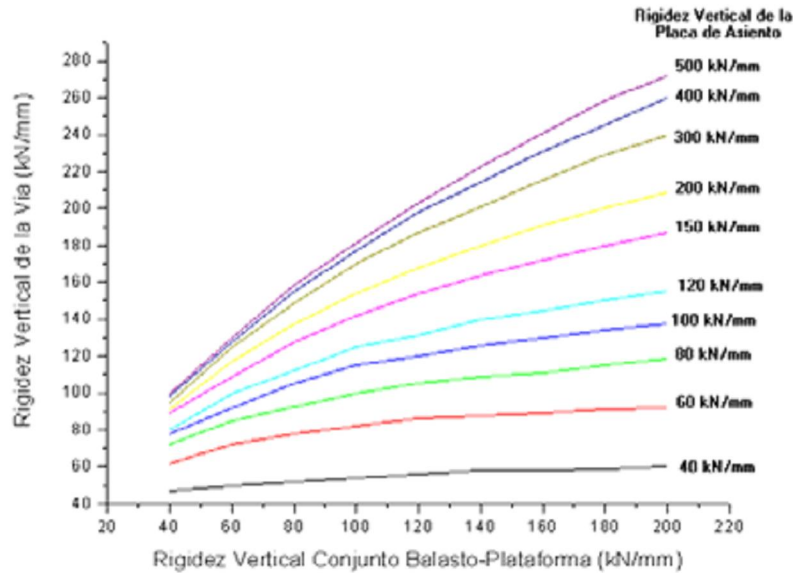


Figura 3.2.8. Rigidesa vertical obtinguda a partir de dades experimentals.

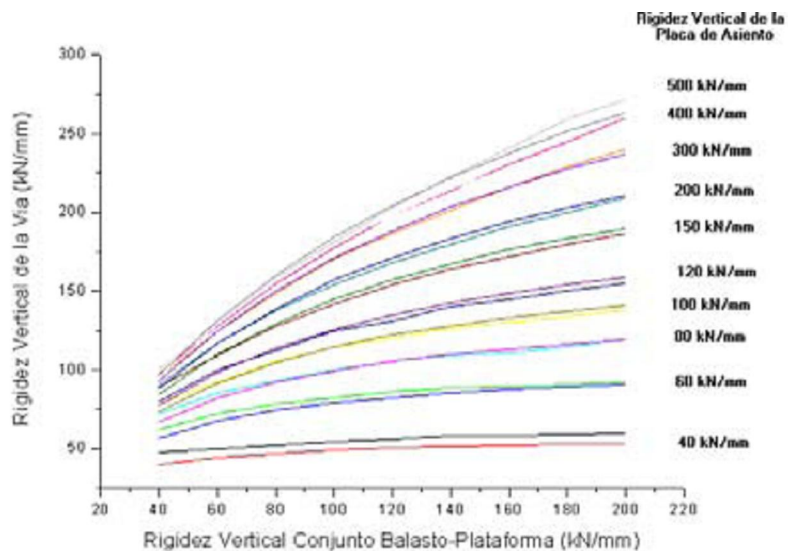


Figura 3.2.9. Comparació del mètode amb la rigidesa experimental.

Com es pot observar a la figura 3.2.9 la diferència entre el valor teòric, calculat amb la fórmula (3.12), i el valor experimental és força minça. Segons Miralbés i Castejón [18] per a plaques amb rigidesa major de 60 kN/mm l'error que es produeix és inferior al 5,3% per a qualsevol altre valor dels paràmetres. Així mateix, per sistemes balast - plataforma que presentin una rigidesa superior a 40 kN/mm l'error que es produeix també és inferior al 5,3%.

3.2.3.3. Representació dels diferents nivells elàstics

A partir d'aquest moment ja es pot obtenir la rigidesa global en cada un dels punts que conformen la transició on es superposa la rigidesa de la infraestructura amb la de la superestructura corresponent, mitjançant la fórmula proposada per Miralbés i Castejón. Per la seva part, la longitud genèrica de cada zona ve definida segons l'apartat 3.1.3 en el qual s'ha definit específicament.

De forma intuïtiva en la següent figura es mostra per a cada punt el valor de la rigidesa que li aporta cada element que el conforma.

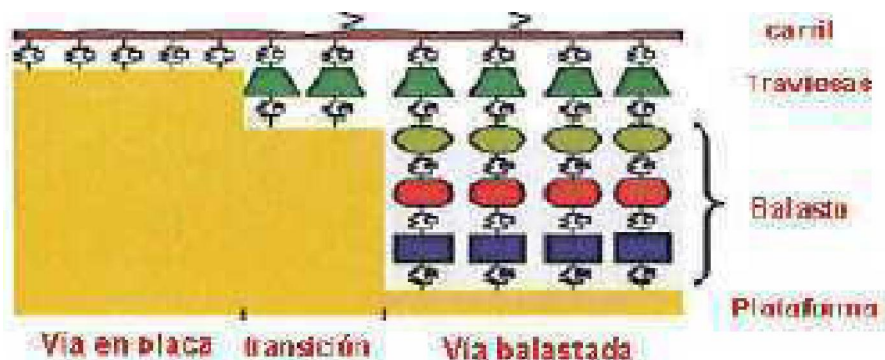


Figura 3.2.8. Esquema dels nivells elàstics per a cada punt de la transició. Extret de [10].

Tram	Transició			
	Via en placa	Artesa	Zona contigua	Balast
Superestructura (kN/mm)	22,5	18,37	23,67	24,67
Infraestructura (kN/mm)	150	120	70	70
Rigidesa equivalent (kN/mm)	56,49	46,75	51,27	52,73

Taula 3.2.5. Rigidesa equivalent per a cada zona de la transició. Elaboració pròpia.

El valor òptim de rigidesa vertical del conjunt de la via segons el professor López Pita [1], atenent als criteris de sobrecàrrega dinàmica i energia consumida, és de 75 – 80 kN/mm per a velocitats de 300 km/h. La metodologia que es va utilitzar per trobar aquest valor es va basar en dos aspectes:

- El primer era que com major fos la rigidesa vertical de la via, majors serien les sobrecàrregues dinàmiques sobre el carril
- El segon, que al disminuir la rigidesa vertical la dissipació d'energia seria més gran, i per tant, major el cost de la tracció.

Aquest valor òptim per a velocitats de 300 km/h és lleugerament superior que per a 200 km/h, ja que en aquest cas l'òptim de rigidesa es situa entre els 50 – 60 kN/mm.

Segons s'explica en [1], P. F. Teixeira (2004) va profunditzar en aquest camí i considerant les dades econòmiques actualment conegudes respecte a les variables de d'energia i manteniment, va establir el gràfic de la figura 3.2.9 en el qual per alta velocitat proporciona un valor òptim per a la rigidesa vertical de la via de 7,8 t/mm.

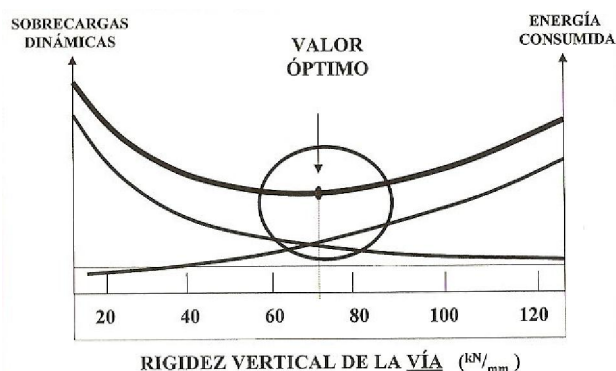


Figura 3.2.9. Gràfic amb l'òptim de rigidesa vertical de la via. Extret de [1].

Pel tram de via de balast aliena a la transició es considera una placa d'assentament de 80 kN/mm i una rigidesa vertical del sistema balast – plataforma de 70 kN/mm. Per la seva part, pel càlcul dels assentaments en plataforma en l'apartat següent es considera en aquest tram de via la rigidesa vertical òptima obtinguda per Teixeira.

3.3. Conclusiones CAPÍTOL 3

En aquest capítol s'han explicat els detalls bàsics de la transició per tal de poder modelitzar-la. Primer de tot s'han descrit les parts que la componen i seguidament s'ha obtingut la longitud de transició segons la velocitat de circulació a partir d'un exemple. Atès que en capítols anteriors s'havia descrit el procediment constructiu de la via de balast i la de placa en aquest s'ha fet una breu introducció de com s'executa.

El pas següent ha sigut descriure com és el funcionament estructural ja que l'objectiu era obtenir la rigidesa vertical de cada zona. Per una part s'ha obtingut la rigidesa corresponent a la infraestructura i per l'altra la de la superestructura. Finalment per obtenir la rigidesa global s'ha aplicat la teoria del coeficient de rigidesa del recolzament.

A partir de l'exemple del túnel de Guadarrama i de les recomanacions per a longitud de la transició s'ha constatat que per un augment de la velocitat de projecte de 50 km/h la transició augmenta en la seva totalitat uns 7 metres la seva longitud. A més a més basant-se en criteris constructius i econòmics lògics, la recomanació de $0,4 \cdot V$ com a longitud és excessiva, de manera que es restringeix per a velocitats baixes.

Respecte a la rigidesa comentar que a nivell de subjeccions, aquestes són més elàstiques en la transició que en la via convencional de balast, però que en conjunt, al tenir en compte la rigidesa dels elements infraestructurals s'aconsegueix una rigidesa global força semblant. D'aquesta manera la plataforma té unes sol·licitacions més homogènies al llarg de la traça de la via amb independència de la tipologia de via que hi hagi instal·lada.

CAPÍTOL 4. MODELITZACIÓ DE LA TRANSICIÓ

En el següent capítol s'explica com s'ha dut a terme la modelització de la transició mitjançant el software de càlcul SAP2000. En el primer apartat es detalla com s'introdueixen el conjunt de dades al programa. A continuació del càlcul es mostren quins són els resultats obtinguts per a poder verificar-los i finalment es duu a terme diverses variacions en el si de la transició.

4.1. Modelització de la transició

Per introduir el conjunt de dades proporcionades en els capítols anteriors i realitzar el càlcul per a determinar quins són els assentaments que es produeixen al llarg de la transició es procedeix de les diferents maneres que es detallen a continuació. A l'annex IV hi ha algunes taules de resultats que dona el programa per a cada càlcul realitzat i en cada punt de la transició, així com el valor de les càrregues que s'han utilitzat.

4.1.1. Disposició de la càrrega

Les càrregues tipus es situen de forma corresponent a la zona on pertanyin tenint en compte els paràmetres de la taula 2.1.2, de manera que la modelització del conjunt de les càrregues tingui una distribució similar a la d'un comboi. Aquests tenen una longitud de fins a 200 metres, i per tant molt superiors a la de la transició. Per situar les càrregues es consideren les següents disposicions de càrregues:

- *Configuració 1*

Atès que el eixos amb més càrrega són els corresponents a la tractora del comboi i per tant els que ofereixen una sol·licitació major, es situa el cap del tren en la via en placa i a continuació, amb la separació corresponent, la resta d'eixos però no amb la càrrega d'un vehicle tipus sinó la càrrega màxima per eix.

En la següent figura es mostra com és la configuració del comboi Talgo 350 EMU, on en la tractora hi ha els eixos motrius amb bogies i en la resta de vehicles els eixos són simples. Amb aquesta configuració es pot determinar com és el comportament de la via al pas del comboi.

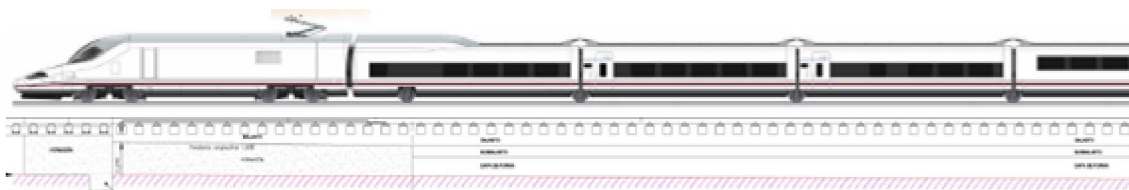


Figura 4.1.1. Configuració 1. Sentit del tren, de via de balast cap a via en placa.

- *Configuració 2*

Amb la mateixa distribució de càrregues però realitzant un canvi de sentit, és a dir, la tractora sobre la via de balast i la resta d'eixos sobre la transició.

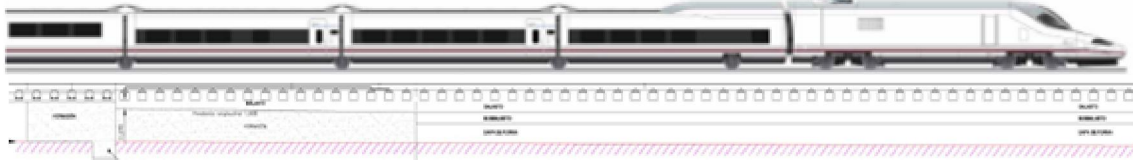


Figura 4.1.2. Configuració 2 de càrregues. Sentit del tren, de via en placa cap a via de balast.

- *Configuració 3*

Per determinar els màxims assentaments que es produeixen en cada tram de la transició, aquests vindran donats per la tractora. Per tant, es considera una distribució de càrregues com si el comboi fos una successió de tractores abarçant tota la transició, amb una distància entre bogies de 11 metres.



Figura 4.1.3. Configuració 3 de càrregues, successió de tractores.

4.1.2. Modelització 1

La primera modelització es basa en la teoria de Winkler (explicada en 3.2.1.1), a partir de les dades de rigidesa vertical de les plaques d'assentament de cada tram de la transició –taula 3.2.5- es realitza la següent aproximació.

- Es crea en el programa una transició corresponent per a una velocitat de 350 km/h, ja que és la velocitat de projecte de les línies d'alta velocitat més recents, tot i que actualment la velocitat comercial màxima que s'està oferint és de 320 a 330 km/h.
- Per aquesta velocitat es situen les càrregues corresponents al pes del carril i la sobrecàrrega dinàmica degut al pas d'un eix d'un vehicle. La rigidesa de la molla és la corresponent a la placa d'assentament, ja que l'objectiu d'aquesta primera modelització és obtenir els assentaments en la superfície del carril degut al pas del vehicle.

Els paràmetres que s'han entrat en el programa de càlcul i els resultats obtinguts són els que es mostren en la taula 4.1.1.

Del conjunt de resultats que s'obtenen només es mostren l'assentament màxim que es produeix en cada tram prèviament definit i la corresponent reacció sobre la travessa.

Càrregues	Via placa	Transició				Via balast
		Placa	Artesa	Z. contigua	Balast	
Carril (kg/ml)	60,34	60,34	60,34	60,34	60,34	60,34
Velocitat	350 km/h					
Rigidesa (kN/mm)	22,5	22,5	22,5	27,5	27,5	80
Assent. MAX (mm)						
Configuració 1	-1,89	-1,76	-1,82	-1,68	-1,66	-0,77
Configuració 2	-0,16	-1,96	-1,93	-1,63	-1,68	-0,75
Configuració 3	-1,91	-1,76	-1,82	-1,62	-1,63	-0,74
Màxim (mm)	-1,91	-1,96	-1,93	-1,68	-1,68	-0,77
Assent. MIN (mm)						
Configuració 1	0,13	-0,85	0,12	0,05	0,05	0,13
Configuració 2	0,06	-0,13	0,06	0,05	0,11	0,02
Configuració 3	0,22	-0,28	0,05	0,05	0,05	0,22
Mínim (mm)	0,22	-0,13	0,12	0,05	0,11	0,22
Reacció MAX (N)						
Configuració 1	42619,95	39537,51	40967,86	46306,03	45750,47	61247,36
Configuració 2	3517,39	44035,14	43468,06	44775,36	46288,75	60333,55
Configuració 3	42933,90	39518,68	40909,25	44447,17	44795,09	59397,64
Màxim (N)	42933,90	44035,14	43468,06	46306,03	46288,75	61247,36
Reacció MIN (N)						
Configuració 1	-2923,18	19101,92	-2677,84	-1373,49	-1402,88	-1543,34
Configuració 2	-1366,33	2843,00	-1355,28	-1402,95	-2993,99	-1837,09
Configuració 3	-4945,37	6204,66	-1233,24	-1290,10	-1313,92	-1788,06
Mínim (N)	-4945,37	2843,00	-2677,84	-1402,95	-2993,99	-1837,09

Taula 4.1.1. Valors d'entrada i valors obtinguts. Modelització 1.

En la següent figura es mostra l'assentament que dona el programa de càlcul. Per visualitzar-lo s'ha utilitzat un factor d'escala vertical 100:1.

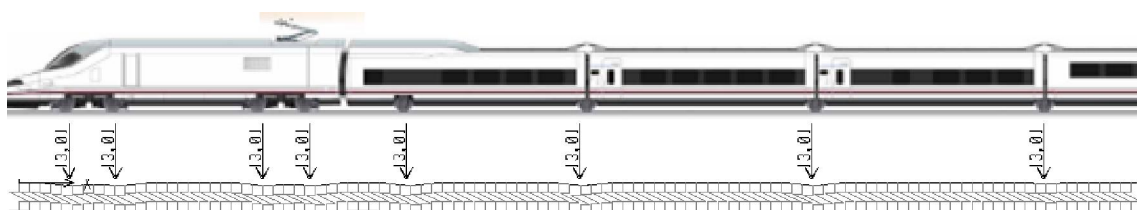


Figura 4.1.4. Càrregues i assentaments deguts al pas d'un comboi a 350 km/h per una transició projectada per 350 km/h, sentit de via balast cap a via placa.

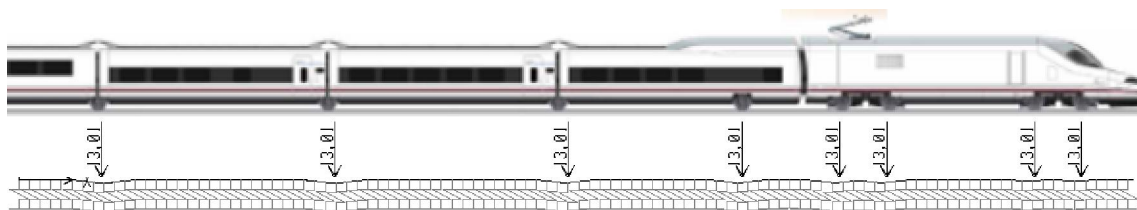


Figura 4.1.5. Càrregues i assentaments deguts al pas d'un comboi a 350 km/h per una transició projectada per 350 km/h en direcció al balast.

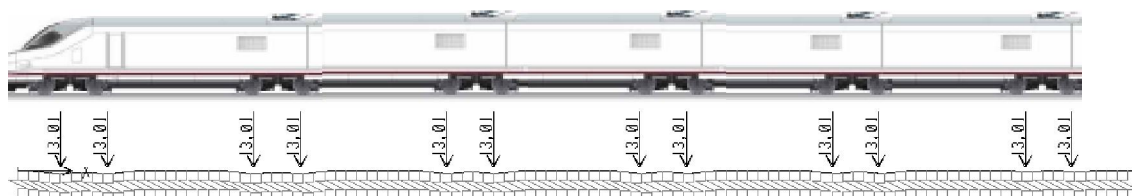


Figura 4.1.6. Càrregues i assentaments deguts a la simulació d'una successió de bogies a 350 km/h per una transició projectada per 350 km/h en direcció al balast.

4.1.3. Modelització 2

La segona modelització també està basada en la teoria de Winkler. En aquest cas la transició és la corresponent per a una velocitat de 300 km/h però les càrregues les corresponents al pas d'un comboi a 350 km/h.

- Es crea en el programa una transició corresponent per a una velocitat de 300 km/h.
- Per una velocitat de 350 km/h es situen les càrregues corresponents al pes del carril i la sobrecàrrega dinàmica degut al pas del vehicle. La rigidesa és la corresponent a la placa d'assentament.

Els paràmetres que s'han entrat en el programa de càlcul i els resultats obtinguts són els que es mostren en la taula 4.1.2.

Càrregues	Via placa	Transició				Via balast
		Placa	Artesa	Z. contigua	Balast	
Carril (kg/ml)	60,34	60,34	60,34	60,34	60,34	60,34
Velocitat	350 km/h					
Rigidesa (kN/mm)	22,5	22,5	22,5	27,5	27,5	80
Assent. MAX (mm)						
Configuració 1	-0,56	-1,89	-1,93	-1,68	-1,63	-0,76
Configuració 2	-0,70	-1,93	-1,88	-1,68	-1,57	-0,76
Configuració 3	-2,04	-1,74	-1,82	-1,93	-1,92	-0,97
Màxim (mm)	-2,04	-1,93	-1,93	-1,93	-1,92	-0,97
Assent. MIN (mm)						
Configuració 1	0,06	-0,95	0,05	0,12	0,05	0,07
Configuració 2	0,07	0,05	0,06	0,06	0,11	0,17
Configuració 3	-0,93	0,05	0,05	0,05	0,05	-0,11
Mínim (mm)	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,17
Reacció MAX (N)						
Configuració 1	12706,3	42568,5	40057,83	46297,39	44775,35	60644,78
Configuració 2	15785,32	43478,36	42401,76	46288,64	43057,49	60453,46
Configuració 3	45835,46	39247,13	40908,33	44447,18	44795,09	77305,35
Màxim (N)	45835,46	43478,36	42401,76	46297,39	44795,09	77305,35
Reacció MIN (N)						
Configuració 1	-1350,75	21439,84	-1233,98	-3234,19	-1402,83	-5249,84
Configuració 2	-1492,81	-1020,87	-1359,81	-1527,22	-2993,99	-4737,31
Configuració 3	20942,88	-1223,96	-1116,27	-1288,37	-1311,52	8678
Mínim (N)	-1492,81	-1223,96	-1359,81	-3234,19	-2993,99	-5249,84

Taula 4.1.2. Valors d'entrada i valors obtinguts. Model 2.1

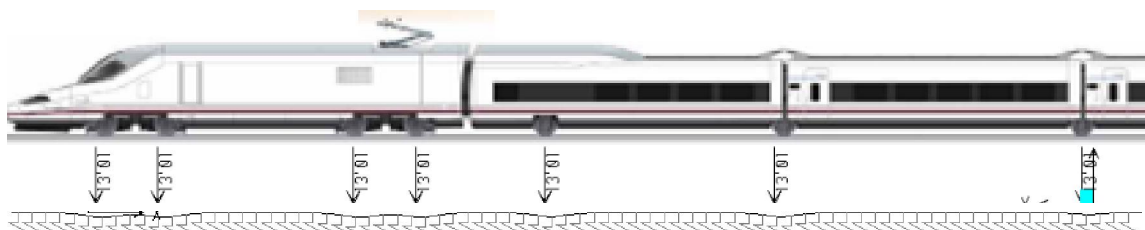


Figura 4.1.7. Càrregues i assentaments deguts al pas d'un comboi a 350 km/h per una transició projectada per 300 km/h, sentit de via balast cap a via placa.

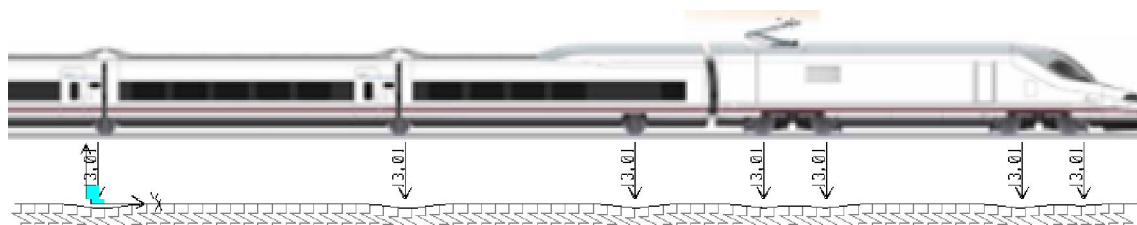


Figura 4.1.8. Càrregues i assentaments deguts al pas d'un comboi a 350 km/h per una transició projectada per 300 km/h en direcció al balast.

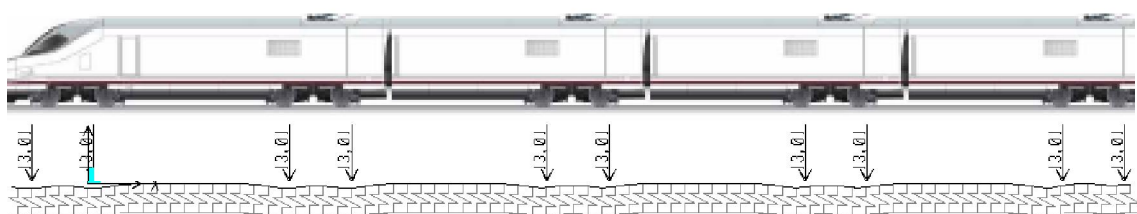


Figura 4.1.9. Càrregues i assentaments deguts a la simulació d'una successió de bogies a 350 km/h per una transició projectada per 300 km/h en direcció al balast.

4.1.4. Modelització 3

La següent modelització es basa en obtenir els assentaments que es produeixen sobre la plataforma a partir de les dades de rigidesa vertical global del conjunt de la transició.

- Es crea en el programa la transició corresponent per a una velocitat de 350 km/h.
- Per aquesta velocitat es situen les càrregues corresponents al pes del carril i la sobrecàrrega dinàmica degut al pas d'un eix d'un vehicle. La rigidesa de la molla és la corresponent a la rigidesa global – taula 3.2.5 - tenint en compte tots els elements elàstics i els pesos dels materials.
- Pel cas particular de la via sobre balast es considera la rigidesa vertical òptima segons la justificació de l'apartat 3.2.3.2.

Càrregues	Via placa	Transició				Via balast
		Placa	Artesa	Z. contigua	Balast	
Carril (kg/ml)	60,34	60,34	60,34	60,34	60,34	60,34
Travessa (kg/ml)	328,33	328,33	525	525	525	525
Balast (kg/ml)	-	-	725,76	1523	1523	1523
Subbalast (kg/ml)	-	-	-	1530	1530	1530
Grava (kg/ml)	-	-	-	1156	1156	1156
Arena (kg/ml)	-	-	-	918	918	918
Formigó (kg/ml)	4200	4200	2362,5	-	-	-
Total (kg/ml)	4589	4589	1311	5712	5712	5712
Velocitat	350 km/h					
Rigidesa (kN/mm)	56,49	56,49	46,75	51,27	52,73	76,44
Assent. MAX (mm)						
Configuració 1	-1,44	-1,00	-1,61	-1,71	-1,65	-1,23
Configuració 2	-0,48	-1,46	-1,67	-1,66	-1,67	-1,21
Configuració 3	-1,45	-1,31	-1,61	-1,67	-1,65	-1,20
Màxim (mm)	-1,45	-1,46	-1,67	-1,71	-1,67	-1,23
Assent. MIN (mm)						
Configuració 1	-0,24	-0,68	-0,50	-0,62	-0,58	-0,41
Configuració 2	-0,26	-0,48	-0,50	-0,59	-0,56	-0,41
Configuració 3	-0,20	-0,53	-0,50	-0,62	-0,56	-0,41
Mínim (mm)	-0,20	-0,48	-0,50	-0,59	-0,56	-0,41
Reacció MAX (N)						
Configuració 1	81366,62	74121,00	75304,57	87726,80	87196,23	93791,27
Configuració 2	27234,93	82510,75	78158,64	85254,59	87986,43	92830,03
Configuració 3	81728,93	74144,64	75270,97	85727,80	86822,68	91922,68
Màxim (N)	81728,93	82510,75	78158,64	87726,80	87986,43	93791,27
Reacció MIN (N)						
Configuració 1	13638,44	24763,22	23487,56	31623,84	30359,46	31678,01
Configuració 2	14765,09	27174,75	23286,50	30147,70	29614,12	31284,55
Configuració 3	11220,26	29837,39	23258,37	31663,94	29541,99	31179,96
Mínim (N)	11220,26	24763,22	23258,37	30147,70	29541,99	31179,96

Taula 4.1.3. Valors d'entrada i valors obtinguts

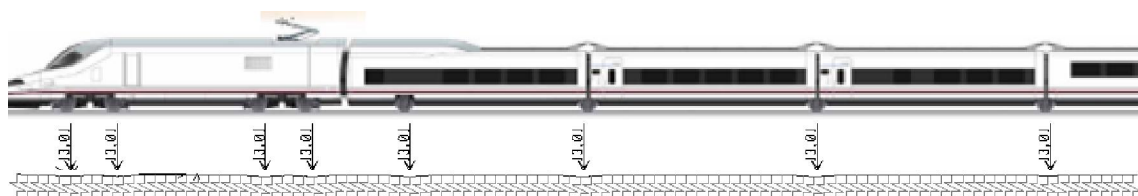


Figura 4.1.10. Càrregues i assentaments deguts al pas d'un comboi a 350 km/h per una transició projectada per 350 km/h, sentit de via balast cap a via placa.

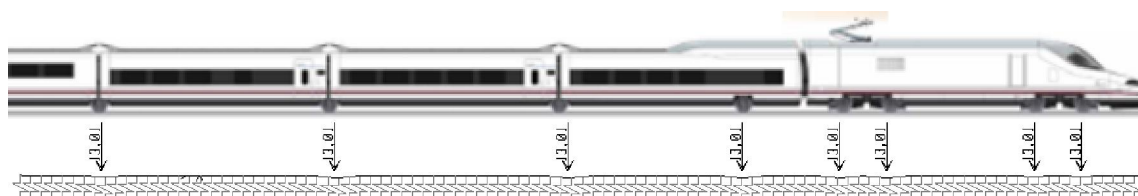


Figura 4.1.11. Càrregues i assentaments deguts al pas d'un comboi a 350 km/h per una transició projectada per 350 km/h, sentit de via balast cap a via placa.

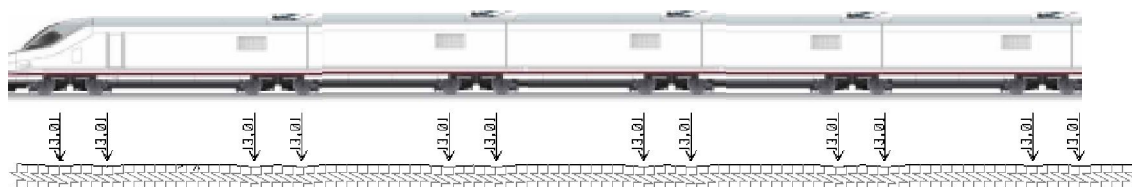


Figura 4.1.12. Càrregues i assentaments degut a la simulació d'una successió de bogies a 350 km/h.

4.1.5. Resultats per a altres velocitats

En la taula 4.1.4 es mostren els assentaments que es produeixen en cada zona de la via en funció de la velocitat considerada. De forma anàloga que en l'apartat anterior es realitzen 3 configuracions de càrregues per determinar l'assentament que es produeix en cada tram d'estudi. A partir d'aquests valors es pot fer una comparació entre ells per veure com varien en funció de la velocitat.

Càrregues	Via placa	Transició				Via balast
		Placa	Artesa	Z. contigua	Balast	
Carril (kg/ml)	60,34	60,34	60,34	60,34	60,34	60,34
Rigidesa (kN/mm)	22,5	22,5	22,5	27,5	27,5	80
Velocitat	0 km/h					
Configuració 1	-1,24	-1,15	-1,20	-1,10	-1,09	-0,50
Configuració 2	-0,11	-1,28	-1,27	-1,07	-1,10	-0,49
Configuració 3	-1,25	-1,15	-1,19	-1,06	-1,07	-0,49
Assent. MAX (mm)	-1,25	-1,15	-1,27	-1,10	-1,10	-0,50
Configuració 1	0,08	-0,56	0,07	0,03	0,03	0,08
Configuració 2	0,03	-0,09	0,03	0,03	0,07	0,01
Configuració 3	0,14	-0,19	0,03	0,03	0,03	0,14
Assent. Min (mm)	0,14	-0,09	0,07	0,03	0,07	0,14
Velocitat	200 km/h					
Configuració 1	-1,75	-1,62	-1,68	-1,55	-1,53	-0,71
Configuració 2	-0,15	-1,80	-1,78	-1,50	-1,55	-0,70
Configuració 3	-1,76	-1,62	-1,68	-1,49	-1,50	-0,68
Assent. MAX (mm)	-1,76	-1,80	-1,78	-1,55	-1,55	-0,71
Configuració 1	0,12	-0,78	0,11	0,05	0,05	0,12
Configuració 2	0,05	-0,12	0,05	0,05	0,10	0,02
Configuració 3	0,20	-0,26	0,05	0,04	0,04	0,20
Assent. Min (mm)	0,20	-0,12	0,11	0,05	0,10	0,12
Velocitat	250 km/h					
Configuració 1	-1,80	-1,67	-1,73	-1,60	-1,58	-0,73
Configuració 2	-0,15	-1,86	-1,83	-1,54	-1,60	-0,71
Configuració 3	-1,81	-1,67	-1,72	-1,53	-1,54	-0,70
Assent. MAX (mm)	-1,81	-1,86	-1,83	-1,60	-1,60	-0,73
Configuració 1	0,12	-0,81	0,11	0,05	0,05	0,12
Configuració 2	0,06	-0,12	0,06	0,05	0,10	0,02
Configuració 3	0,21	-0,26	0,05	0,04	0,04	0,21
Assent. Min (mm)	0,21	-0,12	0,11	0,05	0,10	0,21
Velocitat	300 km/h					
Configuració 1	-1,85	-1,71	-1,77	-1,64	-1,62	-0,75
Configuració 2	-0,15	-1,91	-1,88	-1,59	-1,64	-0,73
Configuració 3	-1,86	-1,71	-1,77	-1,57	-1,59	-0,72
Assent. MAX (mm)	-1,86	-1,91	-1,88	-1,64	-1,64	-0,75
Configuració 1	0,13	-0,83	0,12	0,05	0,05	0,13
Configuració 2	0,06	-0,12	0,06	0,05	0,11	0,02
Configuració 3	0,21	-0,27	0,05	0,05	0,05	0,21
Assent. Min (mm)	0,21	-0,12	0,12	0,05	0,11	0,21

Taula 4.1.4. Valors màxims i mínims d'assentaments en cada tram segons la velocitat.

4.1.6. Resum dels resultats

Amb el conjunt de les configuracions el que s'ha intentat és obtenir quin és el valor dels assentaments que es produeixen en cada tram concret de l'estudi. Mitjançant els models 1 i 2 els resultats obtinguts, com ja s'ha comentat, fan referència a la cota zero del cap del carril. El primer model ha servit per donar un ordre de magnitud i el segon per veure com seria el comportament però per una transició amb una velocitat de pas superior a la de projecte. Finalment, amb el model 3 el que s'ha buscat és l'obtenció dels assentaments que es produirien sobre la plataforma.

En aquest últim cas s'ha de tenir en compte que el pes permanent dels elements de la infraestructura i superestructura que formen el conjunt de la via ja suposen uns assentaments de l'ordre de 0,5 – 0,6 mm, com es mostra en la següent taula.

	Via placa	Transició				Via balast
		Placa	Artesa	Z. contigua	Balast	
Càrrega (kg/ml)	4589	4589	1311	5712	5712	5712
Mínim (mm)	-0,26	-0,48	-0,54	-0,63	-0,58	-0,43
Màxim (mm)	-0,49	-0,50	-0,59	-0,66	-0,64	-0,49

Taula 4.1.5. Assentaments deguts a la càrrega permanent de la infraestructura i superestructura.

Per tant, per trobar els assentaments instantanis que produeix el pas del tren sobre la plataforma s'hauria de restar l'assentament permanent als valors de la taula 4.1.3. De les taules referides a la modelització 3 es conclou que el valor dels assentaments en cada zona és molt similar, de manera que es podria dir que la plataforma no s'assabenta si la infraestructura que suporta és sobre balast o placa.

En la següent taula es mostra per a cada velocitat l'assentament màxim que es produeix respecte el cap del carril.

Velocitat (km/h)	Via placa	Transició				Via balast
		Placa	Artesa	Z. contigua	Balast	
0	-1,25	-1,15	-1,27	-1,10	-1,10	-0,50
200	-1,76	-1,80	-1,78	-1,55	-1,55	-0,71
250	-1,81	-1,86	-1,83	-1,60	-1,60	-0,73
300	-1,86	-1,91	-1,88	-1,64	-1,64	-0,75
350	-1,91	-1,96	-1,93	-1,68	-1,68	-0,77

Taula 4.1.6. Assentament màxim al cap del carril en funció de la velocitat.

Si es prenen com a referència els assentaments que es produeixen a velocitat nul·la s'obté que aquests augmenten de l'ordre d'un 50% com a màxim per a la velocitat més elevada en cada tram. A més a més l'assentament màxim no arriba als 2 mil·límetres i per tant quedaria absorbit pel tipus de subjecció que s'instal·lés a la via.

A més a més el programa de càlcul confirma que el número de travesses afectades per una càrrega és de 5.

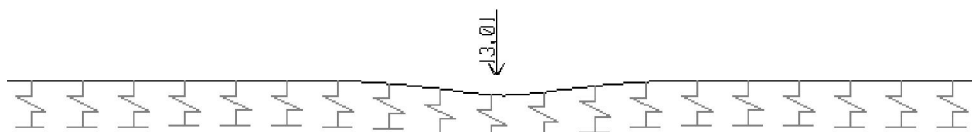


Figura 4.1.13. Nombre de travesses afectades per una càrrega que presenten un assentament.

4.1.7. El pendent dels assentaments per 350 km/h

Per poder comparar les diferents situacions que es donen en l'anàlisi dels assentaments s'ha considerat que una manera òptima de poder interpretar els resultats i que a la vegada sigui gràfica és mitjançant una recta que uneixi els assentaments extrems. El gràfic de la figura 4.1.14 representa la variació en el pla vertical que hauria de realitzar la roda de l'eix d'un vehicle al circular per una transició

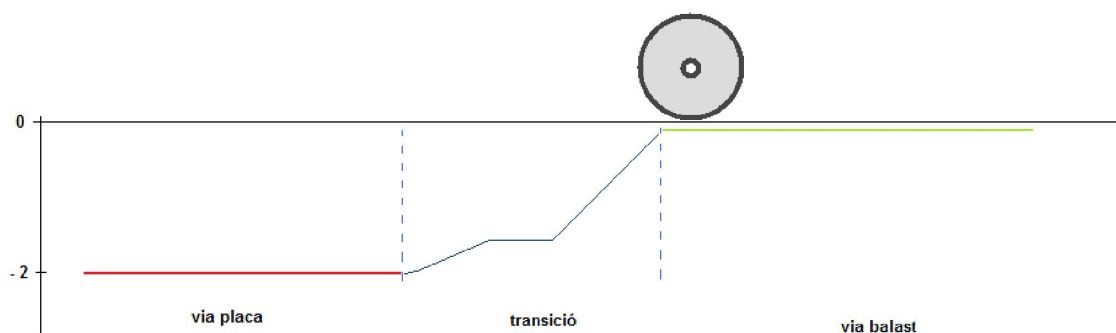


Figura 4.1.14. Representació de l'oscil·lació en el pla vertical que realitza la roda d'un eix d'un vehicle al passar de la via d'un tipus de via a un altre.

A partir dels resultats obtinguts en la modelització 1 - per una velocitat de 350 km/h - es tenen els assentaments màxims i mínims que es produeixen en cada tram, de manera que es pot crear un gràfic com el de la figura 4.1.15 a partir de les dades de la taula 4.1.1 (resumida a continuació). Visualitzant el gràfic s'observa com els assentaments formen un pendent per passar del valor mínim que es produeix en el tram de balast al màxim sobre la placa.

	Via placa	Transició				Via balast
		Placa	Artesa	Z. contigua	Balast	
Assent. MAX (mm)	-1,91	-1,96	-1,93	-1,68	-1,68	-0,77

Taula 4.1.7. Resum dels assentaments màxims de la taula 4.1.1.

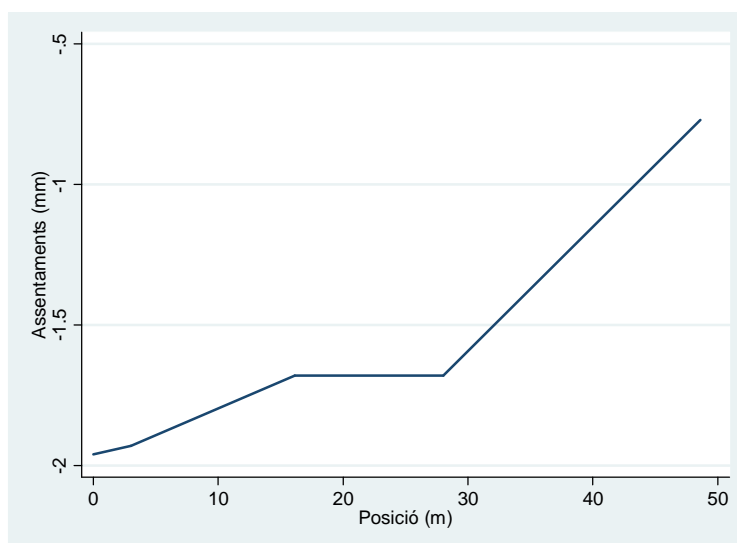


Figura 4.1.15. Representació dels assentaments màxims en cada tram de la via. A l'eix vertical els assentaments (mm) i a l'horitzontal cada zona de la transició (en metres).

En aquest moment es poden considerar dues situacions:

- Interpretar només el pendent que involucra a la transició en exclusiva, és a dir, sense tenir en compte l'assentament que es produeix a la via de balast convencional.
- Tenir en compte els assentaments extrems, és a dir, des de la via en placa a la via de balast incloent la totalitat de la transició.

En la següent taula es mostren els pendents en funció de la velocitat per la qual ha estat projectada la transició, considerant com a càrrega la corresponent a una velocitat màxima de 350 km/h. El pendent “ m_1 ” correspon a la situació “a” i el pendent “ m_2 ” a la “b”. Per calcular aquests pendents s'ha utilitzat la fórmula 4.1.

$$m = \frac{\Delta y}{L_{\text{transició}}} \quad (4.1)$$

m = pendent de la recta

y = diferencia d'assentament

$L_{\text{transició}}$ = longitud de la transició

V_{proj} (km/h)	longitud (m)	y_1 (mm)	y_2 (mm)	m_1 (mm/m) $\times 10^{-3}$	m_2 (mm/m) $\times 10^{-3}$
200	27,77	0,28	1,19	10,08	42,85
250	34,72	0,28	1,19	8,06	34,27
300	41,66	0,28	1,19	6,72	28,56
350	48,61	0,28	1,19	5,76	24,48

Taula 4.1.8. Pendents de les rectes per salvar la diferència d'assentament entre la via en placa i la via de balast.

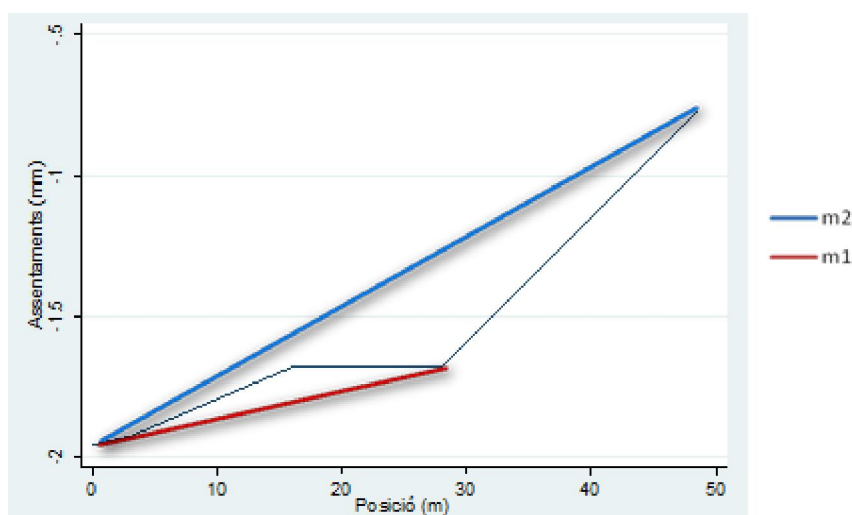


Figura 4.1.16. Rectes de pendents m_1 i m_2 corresponents a les situacions “a” i “b”.

Atès que la funció principal de la transició és permetre un pas gradual des d'un tipus de via a un altre, dels dos tipus de pendents que s'han calculat, el que tindrà una major importància és el que uneix les vies incloent la transició, és a dir, el conjunt de rectes donades per la situació “b”.

A continuació, en la següent figura es mostren els pendents – corresponents a la situació “b” – relatius a cada transició segons la velocitat de projecte considerada i amb la càrrega d'un tren circulant a 350 km/h.

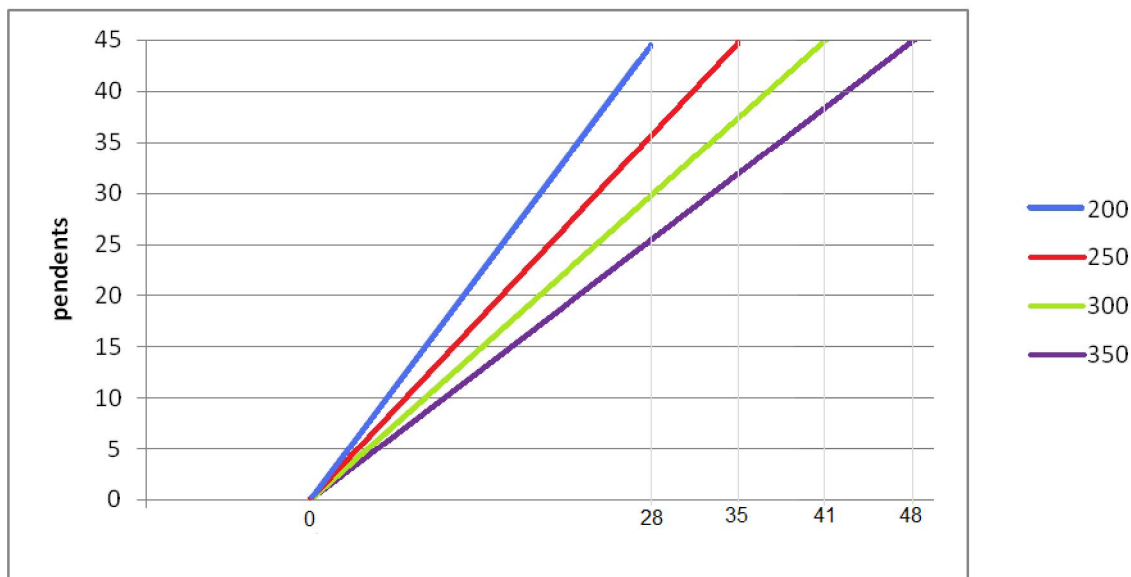


Figura 4.1.17. Comparació de la pendent que formen els assentaments quan circula un comboi a 350 km/h, en funció de la longitud de la transició segons la velocitat de projecte.

Com es pot apreciar en el gràfic anterior, elaborat a partir de la taula 4.1.8, si una transició projectada per una velocitat de 200 km/h hi circula un vehicle a 350, llavors, el pendent de la recta que representa els assentaments augmenta gairebé el doble.

Per poder comparar la qualitat geomètrica exigida per ADIF en les línies d'alta velocitat amb els pendents que formen els assentaments obtinguts de la taula 4.1.8 es procedeix amb el mateix raonament utilitzant la fórmula 4.1, de manera que:

Paràmetre	Valor màxim 200m (mm)		Desviació típica (mm)	
	QN 1	QN2	QN 1	QN2
Anivellació longitudinal 3-25 m	4	8	1,0	1,3
Anivellació longitudinal 25-70 m	6	8	2,0	3,0
Anivellació longitudinal 70-120 m	8	10	3,4	4,0

Taula 4.1.9. Resum de la taula 2.1.1.

QN 1: valor que implica prestar atenció a la via o una operació correctiva programada.

QN 2: valor que exigeix una operació correctiva a curt plaç.

longitud (m)	y (mm)	m_i (mm/m) $\times 10^{-3}$
200	4	20
200	8	40

Taula 4.1.10. Pendent màxim per a una correcció prevista entre assentaments consecutius separats 200 metres.

De l'anterior taula es conclou que a partir d'un pendent dels assentaments superior a 20×10^{-3} mm/m s'ha de prestar atenció a la via o realitzar una operació correctiva. Els pendents que s'han calculat superen aquest llindar en tots els casos, però en el cas concret d'una velocitat de projecte de 350 km/h el pendent sí que és molt proper al

valor recomanable, per tant, només que la transició superés els 50 metres de longitud ja seria suficient.

A partir de la taula 4.1.9 s'obté que per l'anivellació longitudinal, si es considera un interval de 200 metres, quan es superen els 8 mil·límetres s'ha de realitzar una operació correctiva a curt termini. Com es mostra en la taula 4.1.10 el pendent màxim de la recta dels assentaments és de 40×10^{-3} mm/m. Per tant, els valors del pendent que limiten la longitud de la transició varien entre 20×10^{-3} mm/m i 40×10^{-3} mm/m. Per un pendent inferior no seria necessària una actuació sobre la via.

Es conclou que en la resta de casos la diferència entre els assentaments és massa gran i la distància massa petita per assolir la qualitat geomètrica requerida en l'anivellació longitudinal per a vies d'alta velocitat, però entraria dins els límits d'actuacions.

En el gràfic de la figura 4.1.18 es mostra el pendent de la recta dels assentaments corresponent a cada transició en funció de la seva longitud. L'objectiu es veure a partir de quina longitud de transició la relació entre els assentaments satisfà la qualitat geomètrica i quin seria el cas límit que requeriria una intervenció immediata en la via.

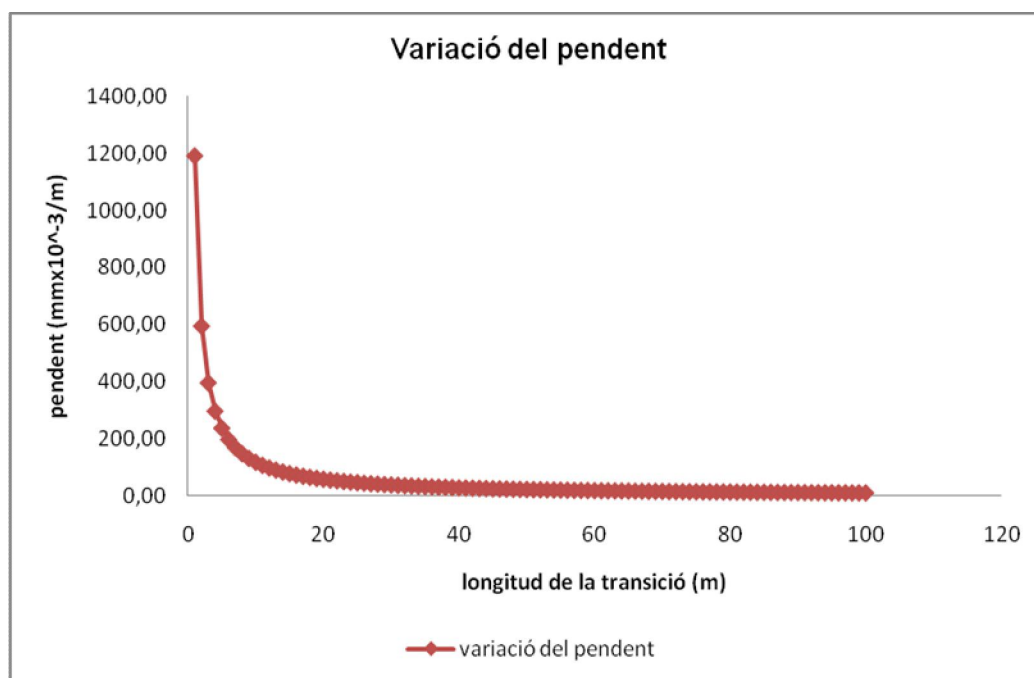


Figura 4.1.18. Representació del valor del pendent de les rectes d'assentament en funció de la longitud de la transició.

La representació de la variació del pendent en funció de la longitud de la transició forma una funció exponencial. Observant la figura anterior es desprèn que per a una longitud inferior a 10 metres el pendent creix exponencialment de manera que al pas dels vehicles el salt que es produiria entre trams seria massa gran, afectant d'una manera molt directa la comoditat del passatger i del material rodant. D'altra banda, a partir dels 20 metres de longitud el pendent es va estabilitzant de forma que el pas d'un tipus de via a un altre seria més progressiu.

4.1.7.1. Ajust matemàtic

Per realitzar l'ajust dels punts representats a una funció matemàtica s'utilitza el programa GeoGebra (versió 3.2.40). Per una longitud entre 1 i 100 metres, la funció que descriu el gràfic de la figura 4.1.17 per un ajust del tipus exponencial és la següent:

$$f(x) = 90,01 \cdot e^{-0,03x} \quad (4.2)$$

Atès que els valors que presenta són extrems i no són prou fidels en l'interval entre els 20 i 60 metres, que vindrien a ser els valors constructivament raonables, una representació més acurada, considerant com a límit inferior 20 metres, queda com a la figura 4.1.19. A més a més la fórmula 4.2 presenta un error comprès entre el 7 i el 25% en l'interval comprès entre els 20 i 60 metres. Per tant, com que l'error és massa elevat es procedeix a realitzar un reajust que sigui més fidel respecte als paràmetres que s'estan representant.

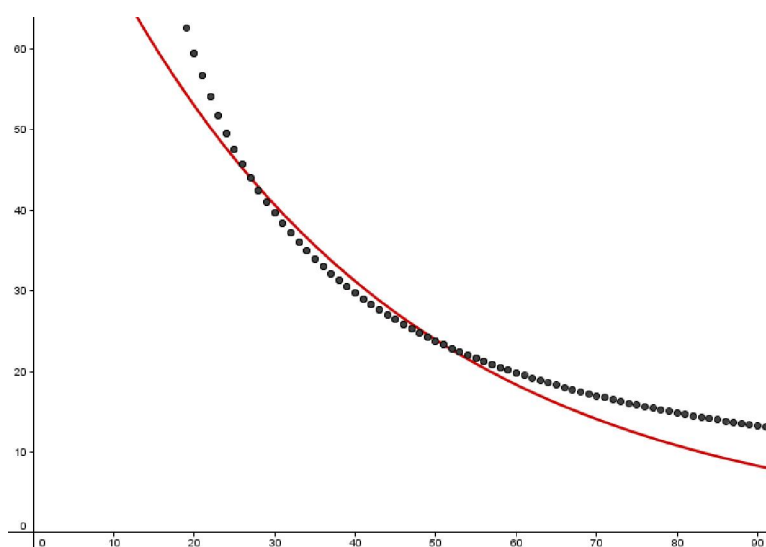


Figura 4.1.19. Comparació de la formulació matemàtica (en vermell) i el valor teòric en l'interval comprès entre 20 i 60 metres.

Matemàticament la funció de tipus proporcionalitat inversa que descriu el gràfic de la figura 4.1.18 és la següent:

$$f(x) = \frac{1189,99}{x} \quad (4.3)$$

Aquesta fórmula matemàtica permet obtenir de forma directa el pendent de la recta que formen els assentaments a partir de la longitud de transició que es vol projectar.

La funció 4.3 descriu els punts que corresponen al pendent dels assentaments amb un error constant del 0,00084%. És a dir, amb aquest model es pot obtenir el pendent amb una fiabilitat molt alta. Com es pot observar en la figura següent la funció s'adapta perfectament a la successió de punts representats per a tots els casos.

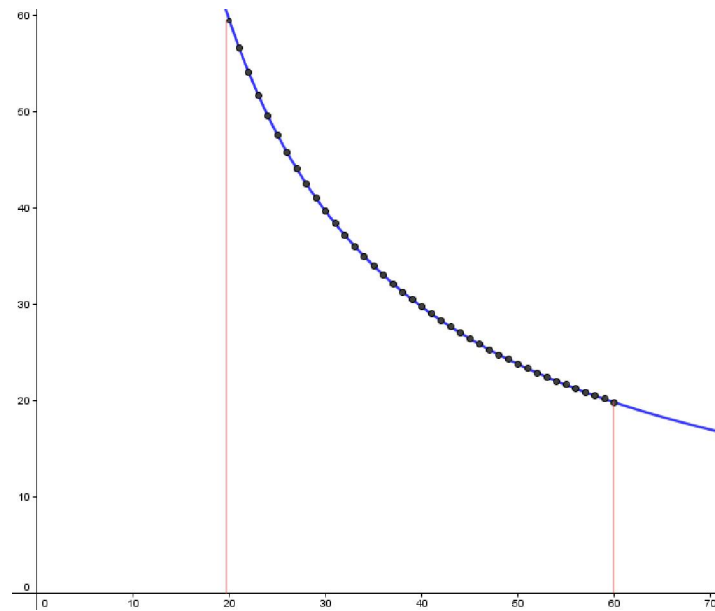


Figura 4.1.20. Representació de la funció pel llinar 20 – 60 metres de longitud. La representació de la funció 4.3 (en blau) segueix fidelment els punts entrats de referència.

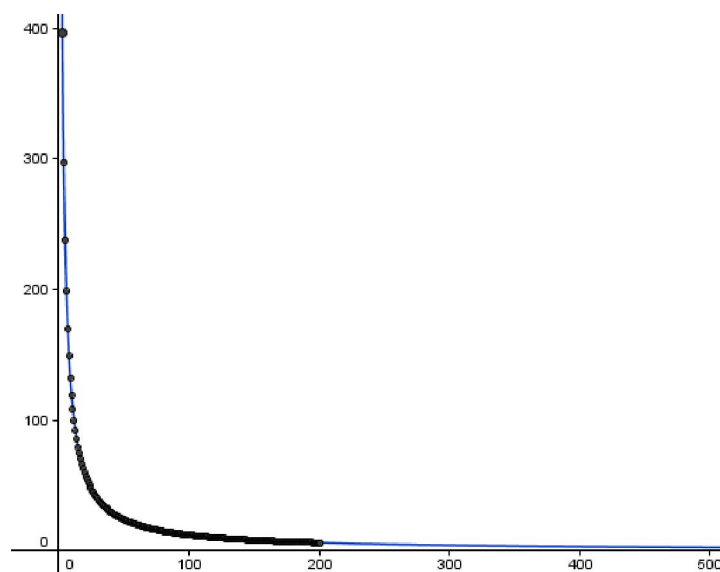


Figura 4.1.21. Representació de la funció sense acotacions per tots els casos. La representació de la funció 4.3 (en blau) segueix fidelment els punts entrats de referència.

A més a més degut a la seva naturalesa, al tractar-se d'una funció injectiva, la fórmula és invertible sense perdre fidelitat. D'aquesta manera enlloc d'obtenir la pendent dels assentaments en funció de la longitud, s'obté la longitud necessària de transició " x " per a un pendent concret " m_i ".

$$x = \frac{1189,99}{m_i} \quad (4.4)$$

Si es tenen en compte els pendents que delimiten la qualitat geomètrica, d'aquí s'obtenen els límits inferior i superior de la longitud de la transició. És a dir, en el cas concret d'una velocitat de 350 km/h, tan el límit inferior de 20 metres com el superior de 60 serien acceptables des del punt de vista de la qualitat geomètrica de la via.

Ja que aquest llindar entra dins el raonablement construïble per les zones de transició, aquestes s'han de controlar per realitzar les pertinents operacions de manteniment programades i si pertoca realitzar una operació correctiva a curt termini.

4.1.8. Ajust matemàtic per a altres velocitats

A partir del raonament exposat a l'apartat anterior es procedeix exactament de la mateixa forma per obtenir l'ajust matemàtic que millor s'adapta a cada cas. Pel cas particular de 0 km/h no té sentit analitzar-lo ja que no hi ha circulació.

Amb les dades de la taula 4.1.6, a partir de la diferència d'assentaments (y) que s'ha de superar entre assentaments extrems de la via sobre placa i sobre balast, s'obté la funció corresponent a cada cas, així com la seva inversa. A més a més, es mostra l'error que es comet amb aquestes funcions respecte els punts que han servit per realitzar l'ajust.

Velocitat	y (mm)	Funció	Funció inversa	Error (%)
200 km/h	1,09	$f(x) = \frac{1089,98}{x} \quad (4.5)$	$x = \frac{1089,98}{m_j} \quad (4.6)$	0,00184
250 km/h	1,13	$f(x) = \frac{1129,98}{x} \quad (4.7)$	$x = \frac{1129,98}{m_j} \quad (4.8)$	0,00178
300 km/h	1,16	$f(x) = \frac{1159,92}{x} \quad (4.9)$	$x = \frac{1159,92}{m_j} \quad (4.10)$	0,00689

Taula 4.1.11. Funcions que descriuen el comportament de les pendents de les rectes per a cada velocitat, a partir del desnivell a superar.

De la taula anterior s'extreu que totes les funcions tenen la mateixa morfologia degut que només varia el paràmetre de proporcionalitat que multiplica a la variable. Per la seva part, aquest valor augmenta o disminueix en 40 unitats si la velocitat de circulació varia 50 km/h en l'interval de 200 a 250 km/h i en 30 unitats per l'interval 250 – 350 km/h. Per tant, es pot afirmar que el paràmetre multiplicador de la variable segueix una llei de tipus quadràtic en l'interval de velocitats entre els 200 i 350 km/h.

L'error que es comet en tots els casos és inferior al 0,01%. Per tant, els models que s'han trobat tenen una fiabilitat molt alta alhora de realitzar els càlculs necessaris.

Per l'extrapolació de les funcions obtingudes a altres velocitats no calculades no hi ha garanties d'èxit ja que s'hauria de tenir en compte el factor multiplicador de la velocitat i la influència del conjunt de masses suspeses i no suspeses del combois que circulen.

4.2. Anàlisi dels resultats

A continuació es du a terme una comparació entre els resultats obtinguts de l'anàlisi realitzat pel programa de càlcul i els valors teòrics fonamentats en el mètode de Zimmermann. Finalment es comparen els resultats obtinguts considerant altres velocitats de circulació.

4.2.1. Mètode de Zimmermann

Per poder quantificar els esforços que un carril transmet als elements que li serveixen de recolzament, és a dir, travesses, balast i plataforma, s'aplica el mètode de Zimmermann. Aquesta metodologia està basada en l'anàlisi d'una biga simple efectuat per Timoshenko a inicis del segle XX, juntament amb la contribució de Saller (1932) i Hanker (1935).

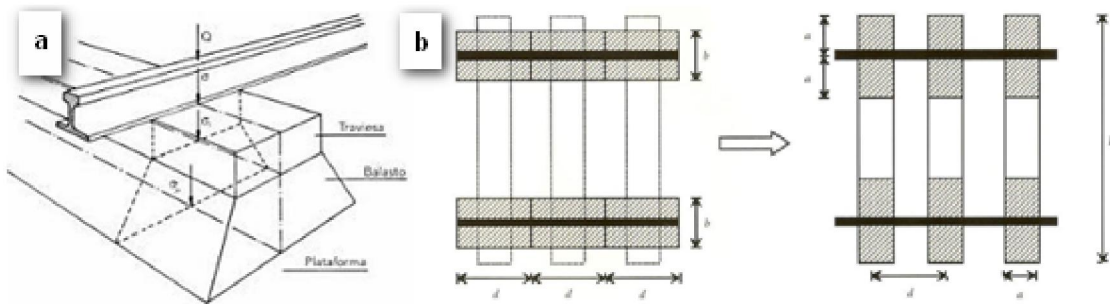


Figura 4.2.1. a) Estudi del comportament d'una via fèrria sota les accions verticals del tràfic. b) Transformació de recolzament sobre travessers continus a recolzament sobre travessers. Extret de [1].

Aquestes expressions estan basades en les hipòtesis de suposar la via recolzada en un medi elàstic segons la teoria de Winkler en la qual la tensió (σ) sobre una superfície ve donada per l'assentament (y) que es produeix sobre un medi elàstic de rigidesa donada pel coeficient de balast (c).

$$\sigma = c y \quad (4.4)$$

El conjunt d'expressions de Zimmermann donen l'assentament (4.5), el moment flector (4.6) i la tensió (4.7).

$$y = \frac{Qd}{2Fc} \sqrt{\frac{Fc}{4Eld}} \quad (4.5)$$

$$M = \frac{Q}{4} \sqrt{\frac{4Eld}{Fc}} \quad (4.6)$$

$$\sigma = \frac{Qd}{2F} \sqrt{\frac{Fc}{4Eld}} \quad (4.7)$$

Q = càrrega per roda (kg)
 d = distància entre travesses (cm)
 c = coeficient de balast (kg/cm^3)
 F = àrea de recolzament de les travesses per fil de carril (cm^2)
 E = mòdul d'elasticitat del carril (kg/cm^2)
 I = moment d'inèrcia del carril respecte l'eix horitzontal (cm^4)

Les fórmules anteriors estan basades per a l'actuació d'una sola càrrega puntual, en el cas que això no sigui així, el gran avantatge que presenta aquest mètode és la possibilitat d'incloure més accions sobre la via amb independència de com sigui la càrrega i la seva posició relativa. Per dur a terme aquest fet només es necessita aplicar el principi de superposició. En la següent figura 4.2.2 es mostra l'ona d'aixecament del carril per a diferents condicions de càrrega. En la realitat, degut a l'ús generalitzat del bogie la consideració d'una càrrega puntual constitueix una situació poc usual.

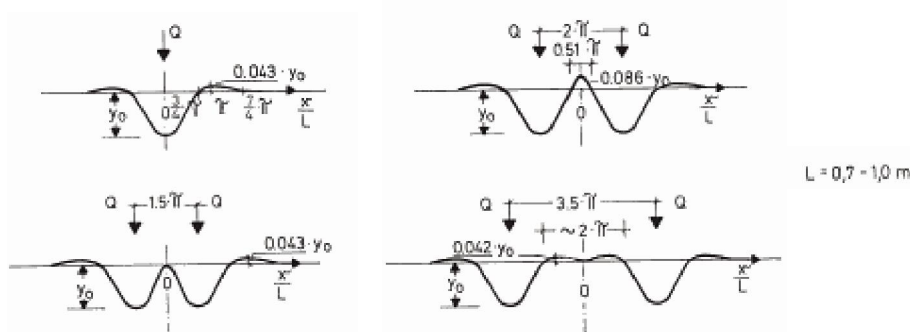


Figura 4.2.2. Ona d'aixecament per a diferents situacions de càrrega. Extret de [1].

Al realitzar l'anàlisi d'una transició els assentaments són diferents en cada tram, definits en capítols anteriors, degut a la diferència del coeficient de balast que caracteritza cada zona.

En la següent taula es mostra per a cada tram el tipus de travessa i coeficient de balast que presenta.

	Transició			Via balastada
Tram	Via placa	Artesa	Zona contigua	
Travessa	B-355	AI-04	AI-04	AI-04
c (kg/cm^3)	50	40	30	30

Taula 4.2.1. Tipus de travessa i coeficient de balast de cada tram.

Al llarg de la transició hi ha dos tipus de travesses, en la zona de via en placa s'utilitza travessa bibloc i per a la zona de balast del tipus monobloc, com s'ha esmentat prèviament en el apartats 2.3.3.2 i 2.2.2 respectivament.

Per calcular l'àrea de recolzament en cada cas es segueix les recomanacions explicades pel professor López Pita [1] que es mostren a continuació.

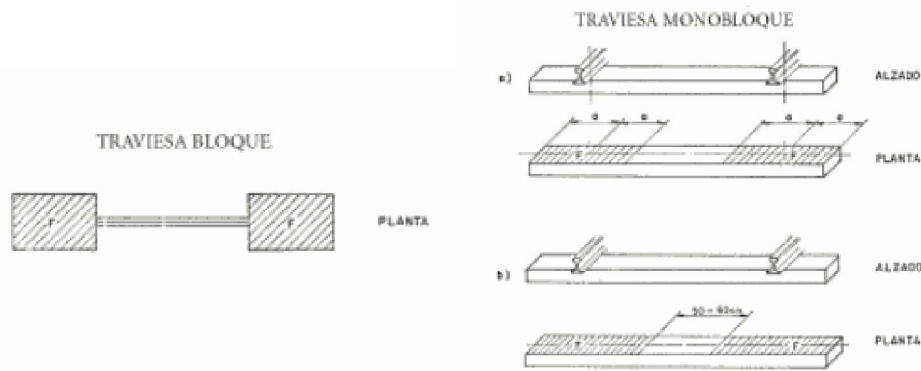


Figura 4.2.3. Criteris per determinar l'àrea de recolzament d'una travessa. Extret de [1].

Travessa	B – 355	AI – 04
F (cm ²)	2614	3230

Taula 4.2.2. Àrea de recolzament de cada travessa. Elaboració pròpia.

4.2.2. Càlculs teòrics

A partir de les fórmules de Zimmerman es calcula per a cada tram de la transició l'assentament teòric que li correspondria en funció de si actua una càrrega sola (eix simple) o bé dues càrregues properes (bogie).

En la taula 4.2.3 es mostren les dades que s'han utilitzat per al càlcul de les fórmules de Zimmerman.

Paràmetre	Placa	Artesa	Balast
d (cm)	60	60	60
c (kg/cm ³)	50	40	30
F (cm ²)	2614	3230	3230
E (kg/cm ²)	2100000	2100000	2100000
I (cm ⁴)	3055	3055	3055

Taula 4.2.3. Dades per al càlcul de les fórmules de Zimmerman.

Per calcular la longitud de via afectada per l'assentament s'utilitza la següent fórmula, basada en la figura 4.2.2.

$$I_1 = 2 \frac{3}{4} \pi L \quad (4.8)$$

On el paràmetre L es denomina longitud elàstica i representa la rigidesa de la via (EI) i la del recolzament d'aquesta (bc). Si el treball que realitza el carril en ambdós casos és el mateix, la superfície de recolzament que ofereix un sistema de via sobre travesses ha de ser igual que la corresponent a un sistema sobre travessers (figura 4.2.1.b).

$$L = \sqrt{\frac{4EI}{bc}} \rightarrow bd = F \rightarrow L = \sqrt{\frac{4Eld}{cF}} \quad (4.9)$$

Per la seva part, l'aixecament màxim de la via també s'obté de la configuració de la figura 4.2.2, on y_0 és l'assentament que es produeix.

$$z = 0,043 \cdot J_0 \quad (4.10)$$

A continuació, en la taula 4.2.4 es mostren els resultats obtinguts per a cada cas concret d'assentament màxim, longitud de via afectada, aixecament màxim de la via i tensió màxima que es produeix en la superfície de la capa de balast.

V (Km/h)	Q _D (kg)	Assentament màxim (mm)			Longitud de via afectada (m)		
		Placa	Artesa	Balast	Placa	Artesa	Balast
0	8500	-0,33	-0,34	-0,42	2,76	2,77	2,98
200	11990	-0,47	-0,47	-0,59	2,76	2,77	2,98
250	12330	-0,48	-0,49	-0,60	2,76	2,77	2,98
300	12670	-0,50	-0,50	-0,62	2,76	2,77	2,98
350	13010	-0,51	-0,51	-0,64	2,76	2,77	2,98
V (Km/h)	Q _D (kg)	Aixecament màxim (mm)			Tensió màxima (kg/cm ²)		
		Placa	Artesa	Balast	Placa	Artesa	Balast
0	8500	0,01	0,01	0,02	1,67	1,34	1,25
200	11990	0,02	0,02	0,03	2,35	1,90	1,76
250	12330	0,02	0,02	0,03	2,42	1,95	1,81
300	12670	0,02	0,02	0,03	2,48	2,00	1,86
350	13010	0,02	0,02	0,03	2,55	2,06	1,91

Taula 4.2.4. Assentament màxim, longitud de via afectada, aixecament màxim de la via i tensió màxima en la superfície de la capa de balast, en funció de la velocitat i per a cada tram de la transició. Elaboració pròpia.

4.2.3. Comparació dels resultats

Amb les dades obtingudes en l'apartat anterior es fa una comparació amb les obtingudes mitjançant el programa informàtic i a la vegada s'utilitzen com a referència els valors de la taula 2.1.1, que corresponen a la qualitat geomètrica que s'exigeix en línies d'alta velocitat.

	Via placa	Transició				Via balast
		Placa	Artesa	Z. contigua	Balast	
velocitat	0 km/h					
Assent. MAX (mm)	-1,25	-1,15	-1,27	-1,10	-1,10	-0,50
Assent. Min (mm)	0,14	-0,09	0,07	0,03	0,07	0,14
velocitat	200 km/h					
Assent. MAX (mm)	-1,76	-1,80	-1,78	-1,55	-1,55	-0,71
Assent. Min (mm)	0,20	-0,12	0,11	0,05	0,10	0,12
velocitat	250 km/h					
Assent. MAX (mm)	-1,81	-1,86	-1,83	-1,60	-1,60	-0,73
Assent. Min (mm)	0,21	-0,12	0,11	0,05	0,10	0,21
velocitat	300 km/h					
Assent. MAX (mm)	-1,86	-1,91	-1,88	-1,64	-1,64	-0,75
Assent. Min (mm)	0,21	-0,12	0,12	0,05	0,11	0,21
velocitat	3500 km/h					
Assent. MAX (mm)	-1,91	-1,96	-1,93	-1,68	-1,68	-0,77
Assent. Min (mm)	0,22	-0,13	0,12	0,05	0,11	0,22

Taula 4.2.5. Resum dels assentaments de les taules 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 i 4.1.4

Paràmetre	Valor màxim 200m (mm)		Desviació típica (mm)	
	QN 1	QN2	QN 1	QN2
Anivellació longitudinal 3-25 m	4	8	1,0	1,3
Anivellació longitudinal 25-70 m	6	8	2,0	3,0
Anivellació longitudinal 70-120 m	8	10	3,4	4,0

Taula 4.2.6. Resum de la taula 2.1.1.

QN 1: valor que implica prestar atenció a la via o una operació correctiva programada.

QN 2: valor que exigeix una operació correctiva a curt plaç.

Si es realitza una comparació dels valors de les taules 4.2.4, 4.2.5 i 4.2.6 s'observa:

- Amb el mètode de Zimmerman el valor de l'assentament és del 26% respecte el que dona la modelització pels trams de via en placa i artesa. Pel balast el valor empíric és un 83% del valor calculat, per tant en aquest cas si que els resultats concorden.
- Una vegada comparats els resultats s'ha constatat que pel tram de via sobre balast els valors concorden, però no així per la zona de via en placa. Això és degut a que les fórmules de Zimmerman van ser concebudes per a via sobre balast i no sobre placa.
- Per l'ona d'aixecament amb les fórmules de Zimmerman els valors són de l'ordre del 10% que els obtinguts amb el programa informàtic.
- Es compleix que l'ona d'aixecament és de l'ordre del 10% de l'assentament.
- Els assentaments que dona el programa de càlcul entren dins el llindar que s'exigeix per a línies d'alta velocitat per nivellació longitudinal.
- Si es té en compte que el tipus de subjecció que s'utilitza en les transicions – loarv 300 – té una tolerància per als moviments verticals de 2,5 mil·límetres, llavors els assentaments que es produeixen en la superfície del carril queden absorbits per aquest element.

4.3. Modificació de la distància entre travesses

En aquest apartat es realitza una modificació en la transició que correspon a disminuir la distància entre les travesses en 5 centímetres, deixant-la en 55.

4.3.1. Modelització

Es realitza una modelització de la transició per una velocitat de projecte de 350 km/h i una velocitat de circulació també de 350. De forma anàloga que en l'apartat 4.1 es realitzen 3 configuracions de càrregues per determinar l'assentament màxim i mínim que es produeix en cada tram d'estudi. Els resultats obtinguts es resumeixen en la següent taula:

Càrregues	Via placa	Transició				Via balast
		Placa	Artesa	Z. contigua	Balast	
Carril (kg/ml)	60,34	60,34	60,34	60,34	60,34	60,34
Velocitat	350 km/h					
Rigidesa (kN/mm)	22,5	22,5	22,5	27,5	27,5	80
Assent. MAX (mm)						
Configuració 1	-1,79	-1,64	-1,71	-1,60	-1,58	-0,76
Configuració 2	-0,13	-1,85	-1,82	-1,53	-1,60	-0,76
Configuració 3	-1,82	-1,64	-1,71	-1,54	-1,55	-0,74
Màxim (mm)	-1,82	-1,85	-1,82	-1,60	-1,60	-0,76
Assent. MIN (mm)						
Configuració 1	0,22	-0,78	0,11	0,05	0,05	0,02
Configuració 2	0,06	-0,10	0,06	0,05	0,10	0,02
Configuració 3	0,42	-0,24	0,05	0,04	0,05	0,02
Mínim (mm)	0,42	-0,10	0,11	0,05	0,10	0,02

Taula 4.3.1. Valors d'entrada i valors obtinguts. La distància entre travesses és de 55 cm.

	Via placa	Transició				Via balast
		Placa	Artesa	Z. contigua	Balast	
Assent. MAX (mm)	-1,91	-1,96	-1,93	-1,68	-1,68	-0,77
Assent. Min (mm)	0,22	-0,13	0,12	0,05	0,11	0,22

Taula 4.3.2. Resum dels assentaments de la taula 4.1.1. La distància entre travesses és de 60 cm.

Per veure si es produeix una variació en els assentaments situant les travesses amb una separació de 55 centímetres es comparen els valors de la taula 4.3.1 amb els de la taula 4.3.2.

Assent. MAX (mm)	Via placa	Transició				Via balast
		Placa	Artesa	Z. contigua	Balast	
d = 60 cm	-1,91	-1,96	-1,93	-1,68	-1,68	-0,77
d = 55 cm	-1,82	-1,85	-1,82	-1,60	-1,60	-0,76
Diferència (mm)	0,09	0,11	0,11	0,08	0,08	0,01
Diferència en %	4,7%	5,6%	5,7%	4,7%	4,7%	1,3%

Taula 4.3.3. Comparació de resultats

Amb aquesta reducció de la separació entre travesses s'aconsegueix una reducció dels assentaments entre el 4,7% i 5,7% en les zones de via en placa i de la transició. En canvi en la zona de via sobre balast la reducció és lleugerament superior a l'1%.

4.3.2. Conclusions de la disminució de la distància entre travesses

A la vista dels resultats obtinguts es conclou que en el si de la transició una reducció de la distància entre travesses significa una millora considerable pels següents motius:

- Es redueixen els assentaments en valor absolut sobre la superfície del carril, de manera que la qualitat geomètrica de la via és més bona i a la vegada afavoreix la conservació de la infraestructura. Al tram de via sobre balast no resulta rentable, ni tècnicament ni econòmicament, la instal·lació de travesses amb una separació inferior als 60 centímetres.
- Al ser inferiors els assentaments en totes les zones, excepte en la via de balast aliena a la transició, el pendent de la recta que formen els assentaments es redueix.

A partir de la fórmula 4.1 i seguint el raonament de l'apartat 4.1.5 s'obté el pendent de la recta que formen el conjunt d'assentaments.

V (km/h)	longitud (m)	d (cm)	Nombre travesses	y (mm)	m_i (mm/m) $\times 10^{-3}$
350	48,61	60	81	1,19	24,48
350	48,61	55	89	1,10	22,63

Taula 4.3.4. Comparació de pendents.

El fet de disminuir la separació en 5 centímetres implica utilitzar només 8 travesses més en aquesta transició per aconseguir uns assentaments menors, de manera que el pendent de la recta és més proper al valor de 20×10^{-3} mm/m que s'exigeix per tal que l'anivellació longitudinal compleixi amb la qualitat geomètrica que s'exigeix.

4.4. Conclusions CAPÍTOL 4

Una vegada descrita la configuració de càrregues que s'utilitza per obtenir els assentaments màxims en cada zona es procedeix a la simulació a partir de les dades del capítol 3. Seguidament es calcula a partir de la teoria de Zimmerman quin seria el valor dels assentaments per tal de tenir una referència en que basar-se.

Així doncs, es compleix que l'ona d'aixecament és de l'ordre del 10% de l'assentament, segons les fórmules de Zimmerman.

Els assentaments que dona el programa de càlcul entren dins el llindar que s'exigeix per a línies d'alta velocitat per anivellació longitudinal si la transició ha estat projectada per una velocitat igual o superior.

Ja que el llindar comprès entre els 20 i 60 metres entra dins el raonablement construïble per les zones de transició, aquestes s'han de controlar per realitzar les pertinents operacions de manteniment programades i si pertoca realitzar una operació correctiva a curt plaç.

Si es redueix la distància entre travesses de 60 a 55 centímetres es redueixen els assentaments i augmenta la qualitat geomètrica de la via, fet que afavoreix la conservació.

CAPÍTOL 5. CONCLUSIONS

A continuació s'exposen les conclusions a que s'ha arribat al final de la tesina així com algunes recomanacions per a futurs treballs.

5.1. Conclusions

Les principals conclusions de la present tesina es poden resumir en:

- Així doncs, l'ús de la via en placa queda plenament justificat, valorant criteris econòmics, en el cas de línies que tinguin un nivell de servei molt elevat perquè es garanteix la qualitat geomètrica de la via amb un manteniment molt inferior, en trams de túnel i viaductes perquè es redueix l'altura de construcció i es disminueix el pes i en línies on la velocitat de circulació sigui superior als 330 km/h ja que s'evita el fenomen de la volada del balast.
- Degut a l'absència d'una normativa concreta per a la via en placa, s'han d'aplicar les disposicions relatives a la instrucció de formigó, és a dir, la EHE-08 en les parts de la via que estiguin compostes per aquest element. Per tant s'ha de complir la quantia mínima d'armadura en les lloses i s'ha de limitar l'ample màxim de fisura segons l'actual normativa espanyola.
- Per un augment de la velocitat de projecte de 50 km/h la transició augmenta en la seva totalitat uns 7 metres la seva longitud.
- La recomanació de $0,4V$ és vàlida per velocitats baixes, al voltant dels 50 km/h.
- La recomanació de $1/3V$ vàlida però en el llindar de la qualitat geomètrica i per tant s'ha de prestar especial atenció en les transicions dissenyades segons aquest criteri.
- Es compleix que l'ona d'aixecament és de l'ordre del 10% de l'assentament, segons les fórmules de Zimmerman.
- De les taules referides a la modelització 3 es conclou que el valor dels assentaments en cada zona és molt similar, de manera que es podria dir que la plataforma no s'assabenta si la infraestructura que suporta és sobre balast o placa.
- Els assentaments que dona el programa de càlcul entren dins el llindar que s'exigeix per a línies d'alta velocitat per anivellació longitudinal si la transició ha estat projectada per una velocitat igual o superior.
- Si es té en compte que el tipus de subjecció que s'utilitza en les transicions – loarv 300– té una tolerància per als moviments verticals de 2,5 mil·límetres, llavors els assentaments que es produeixen en la superfície del carril queden absorbits per aquest element.

- Per dissenyar la transició el més recomanable és que la pendent dels assentaments que es formin, que depenen directament de la velocitat de pas, entri dins els paràmetres de qualitat geomètrica exigida per l'administració.
- En una transició dissenyada per a una velocitat concreta, si la velocitat de pas és superior, els assentaments que s'hi produeixen són tolerables en valor però no en espaïament entre ells. De manera que no es pot assolir la qualitat geomètrica requerida en l'anivellació longitudinal per a vies d'alta velocitat.
- Ja que el llindar comprès entre els 20 i 60 metres entra dins el raonablement construïble per les zones de transició, aquestes s'han de controlar per realitzar les pertinents operacions de manteniment programades i si pertoca realitzar una operació correctiva a curt plaç.
- Si es redueix la distància entre travesses de 60 a 55 centímetres:
 - § Es redueixen els assentaments entre un 4,7% i un 5,7% en les zones de via en placa i transició, de manera que la qualitat geomètrica de la via és més bona i a la vegada afavoreix la conservació de la infraestructura.
 - § L'augment de material que suposa queda plenament justificat per la millora en la qualitat geomètrica.
 - § Al tram de via sobre balast només s'aconsegueix una reducció dels assentaments del carril de l'1%. Per tant, no resulta rentable ni tècnicament ni econòmicament la instal·lació de travesses amb una separació inferior als 60 centímetres en aquesta zona.

5.2. Recomanacions per a futurs treballs

Les possibles recomanacions per a futurs estudis i treballs són les següents:

- Tenir en compte la massa suspesa i no suspesa dels vehicles pel càlcul de la càrrega dinàmica.
- Estudiar la transició per velocitats baixes, per exemple, en l'entrada a les estacions.
- Estudiar la transició entre tipologies que no utilitzin balast.
- Realitzar el càlcul per a velocitats superiors als 350 km/h.
- Veure quin seria el comportament de les transicions en el cas de vies de tràfic mixt, per tal de quantificar l'augment de càrrega que suposaria el pas de trens de mercaderies.

ANNEX I. SECCIONS DE VIA SOBRE BALAST

En aquest annex es mostren diferents detalls de la secció transversal d'una via de balast en diferents situacions.

- *Via recta sobre plataforma natural*

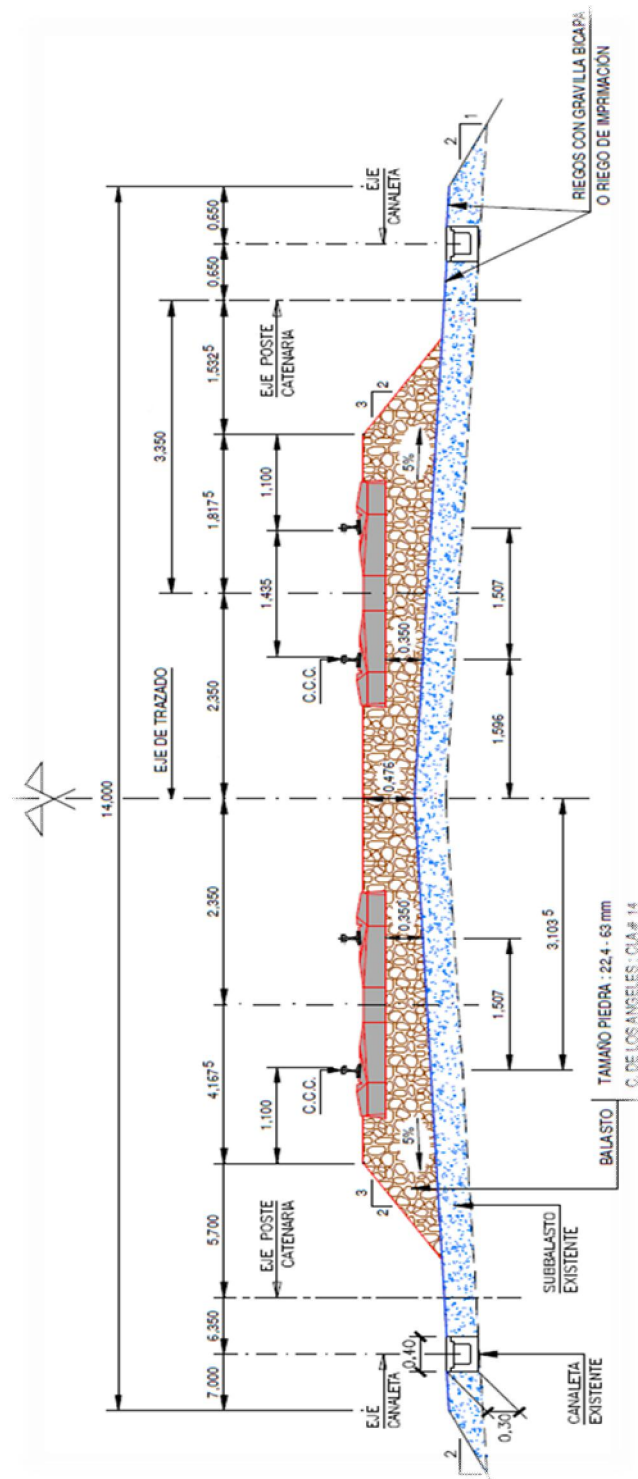


Figura 1. Via doble en tota la seva extensió

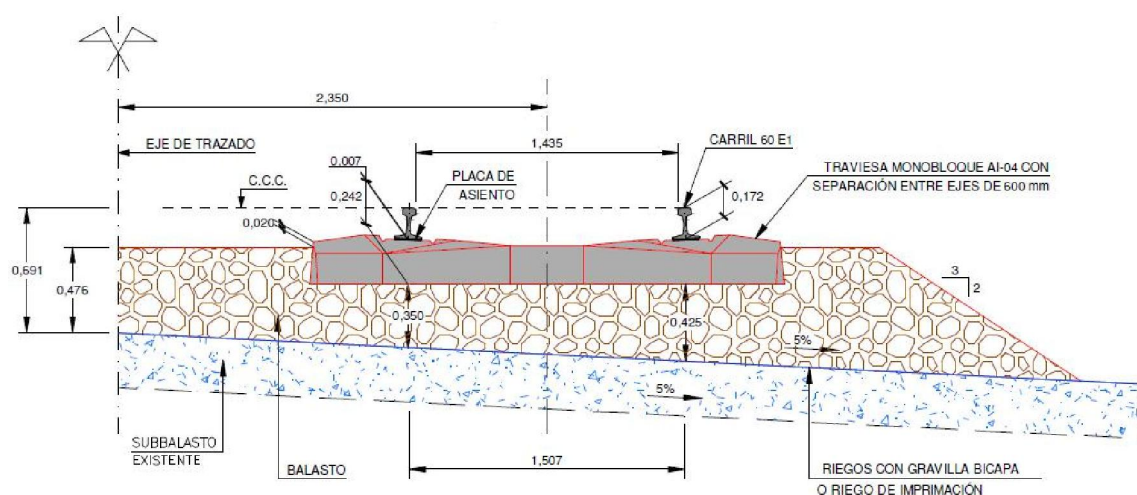


Figura 2. Detall de la secció amb les cotes corresponents a la situació respecte l'eix de la via.

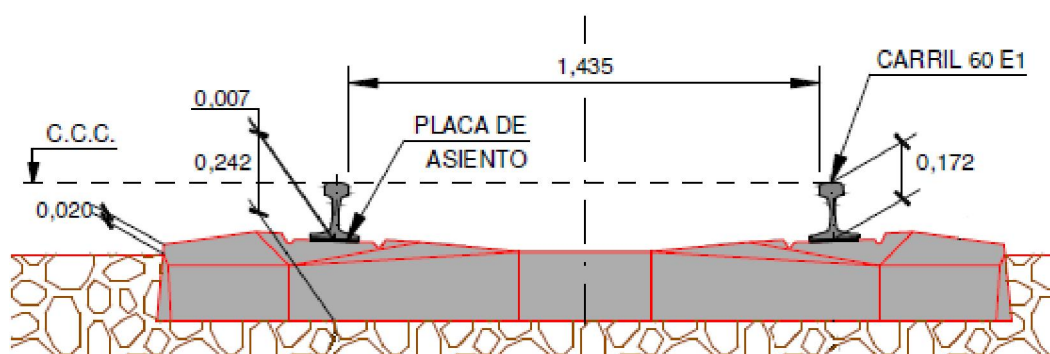


Figura 3. Detall de la posició de la travessa amb les corresponents cotes.

- *Via corba sobre plataforma natural*

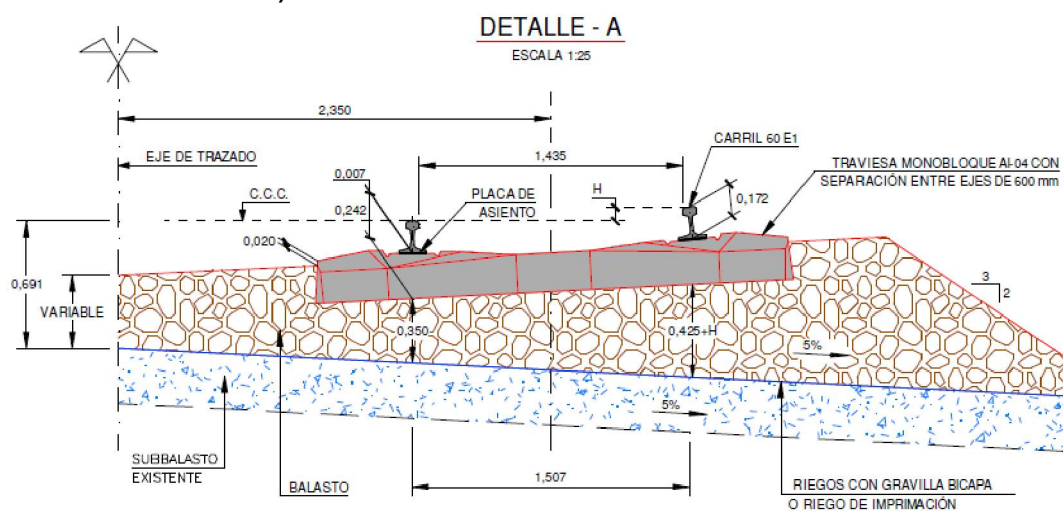


Figura 4. Detall de la posició de la travessa exterior en un tram de corba

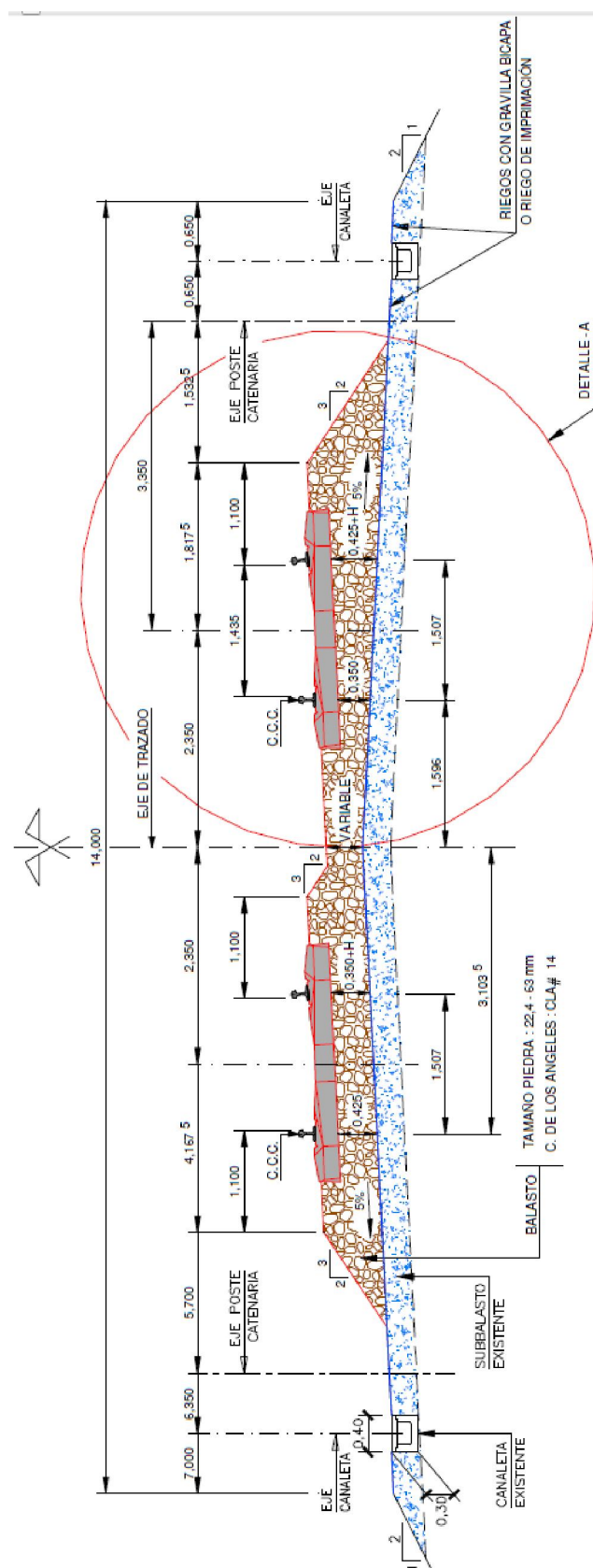


Figura 5. Via doble en un tram de corba, es pot veure el peralt que dona el recreixement del balast ja que a la plataforma només se li dona la inclinació a dues aigües per al drenatge.

- *Via sobre obra de fàbrica*

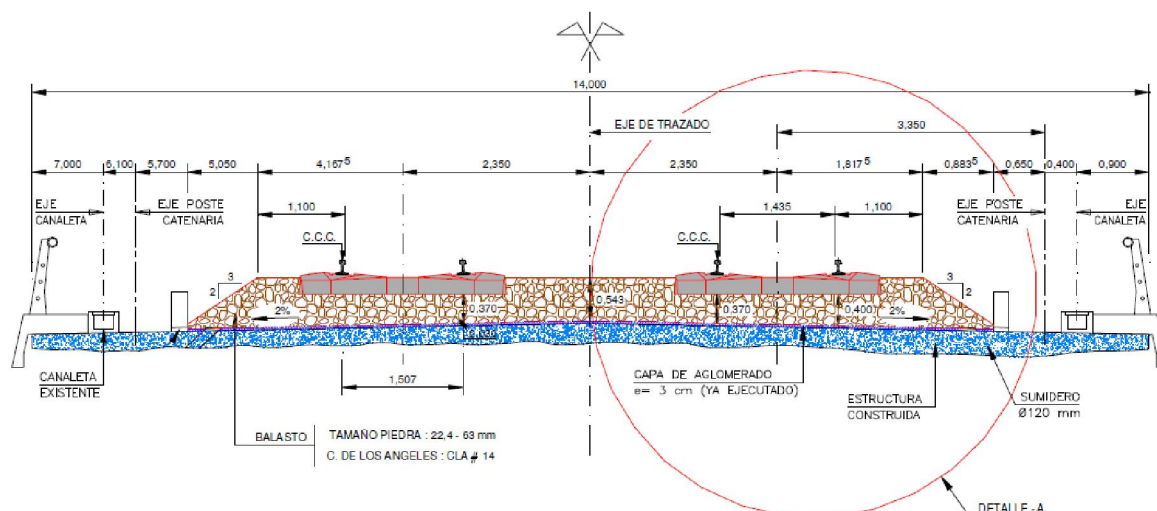


Figura 6. Sobre una obra de fàbrica enloc del subbalast hi ha formigó i per tant per disminuir el nivell de pressions que arriben a l'estructura s'augmenta el gruix de la cap de balast.

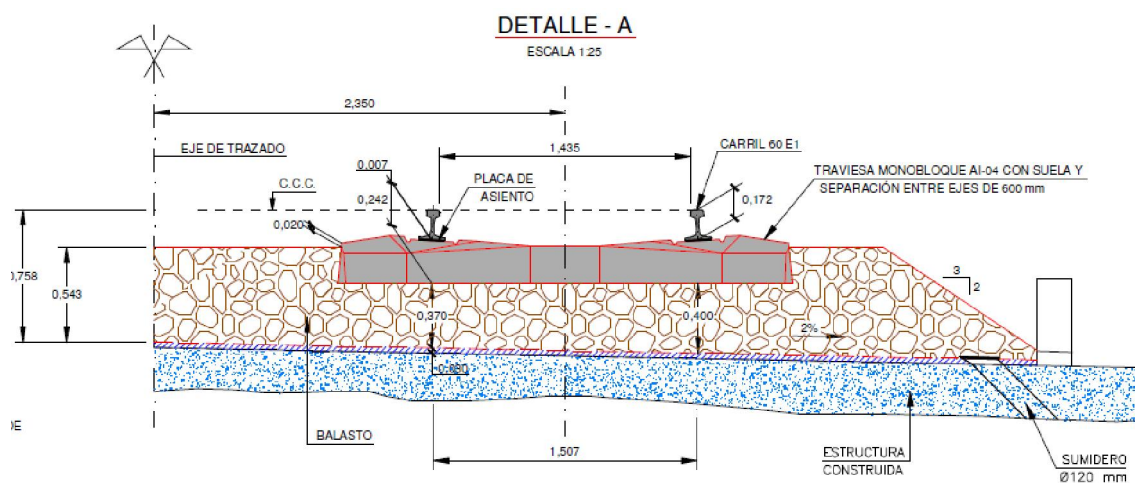


Figura 7. Per garantir el drenatge l'obra de fàbrica té una inclinació del 2%, a més a més es col·loquen travesses amb sola elàstica per tal de donar major elasticitat al conjunt. Tot i així la distància entre travesses es manté constant a 60 centímetres.

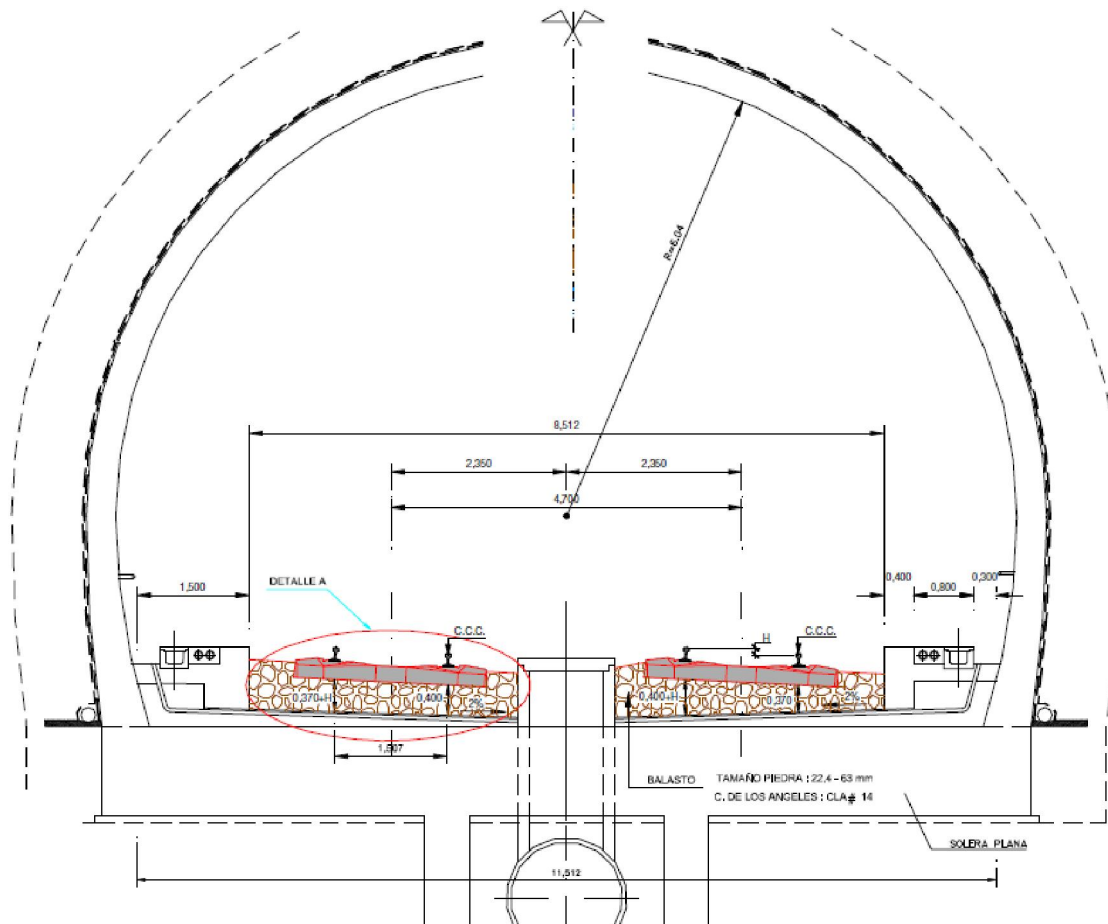
- *Via en túnel*

Figura 8. La solera de formigó del túnel és plana i té un col·lector en la seva part central per evacuar l'aigua que es filtra. Sota les travesses només hi ha balast ja que sota aquest hi ha una capa de formigó que té un pendent del 2% per tal d'ajudar al drenatge de l'aigua que es filtra. En aquesta figura el túnel és de via doble, per tant el radi necessari de la volta és de més de 6 metres ja que la entrvia és la mateixa que en les vies a cel obert.

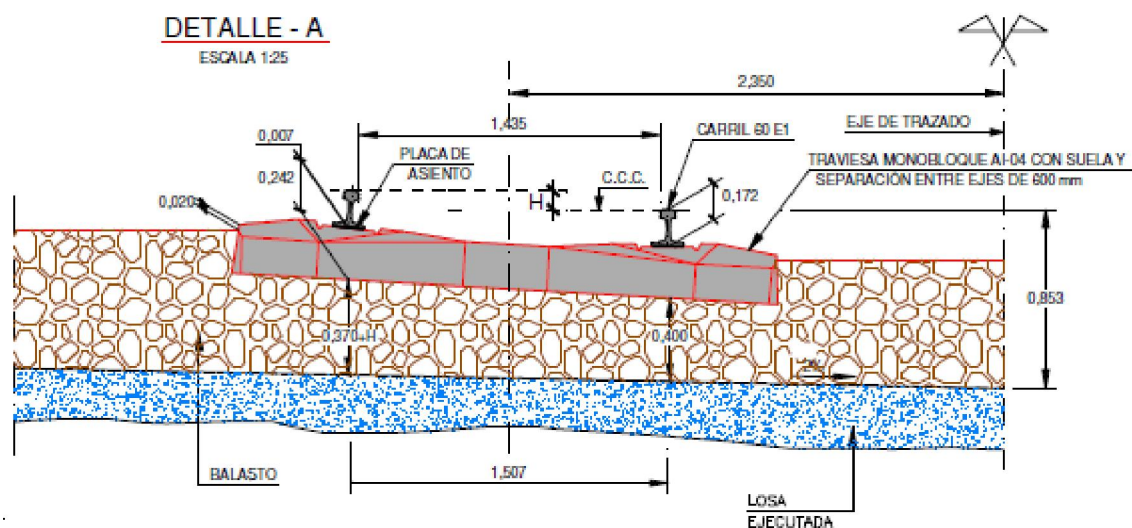


Figura 9. En aquest detall es pot observar com s'ha augmentat el gruix del balast sota les travesses i com aquestes incorporen una sola elàstica per disminuir la rigidesa del conjunt.

ANNEX II. SECCIONS DE VIA SOBRE PLACA

En aquest annex es mostren diferents vistes de les seccions de diversos tipus de via en placa. En concret es mostren 8 tipologies, 2 corresponen a sistemes sobre aglomerat asfàltic, 3 de sistemes sobre llosa de formigó i 3 de prefabricats.

Via sobre aglomerat asfàltic:

- ATD, Alemanya (2000)

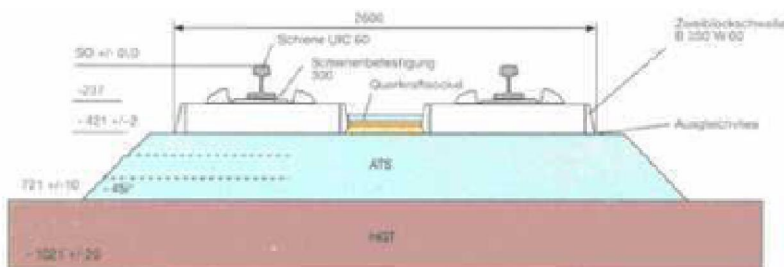


Figura 1. Aquest sistema està compost per una capa d'aglomerat asfàltic de 30cm que es recolza sobre una llosa inferior de formigó.

- GETRAC – A1, Alemanya (2000)

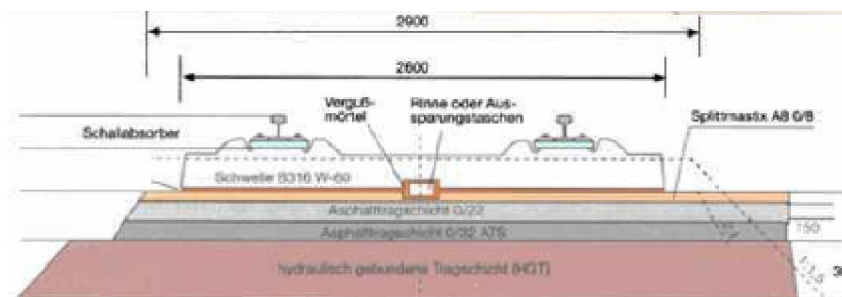


Figura 2. Sobre la capa de formigó es dipositen dues capes diferents d'aglomerat.

Via sobre llosa de formigó:

- Rheda classic, Alemanya (1972)

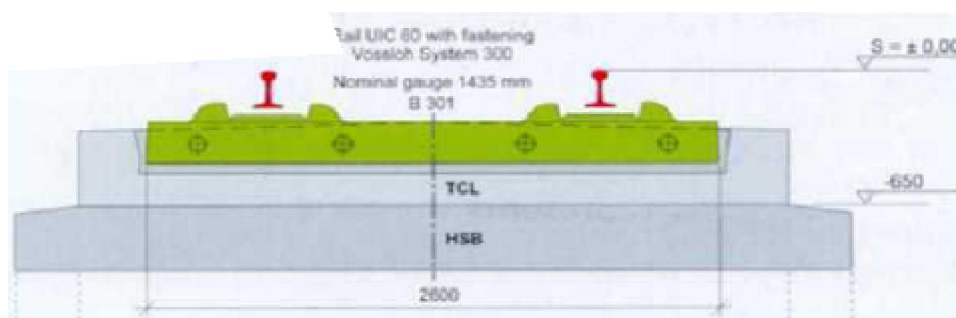


Figura 3. La llosa inferior és de formigó i la superior es tracta d'una artesa. La travessa és monobloc i pretensada.

- Rheda Dywidag, Alemanya (1980)

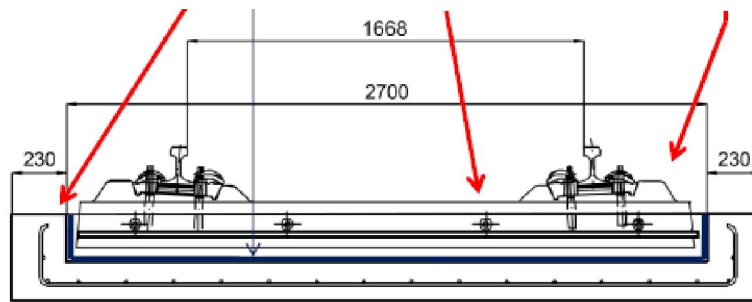


Figura 4. Entre l'artesa i la travessa es situa un elastòmer per donar elasticitat la conjunt. La travessa continua sent pretensada però ja disposa d'armadura transversal.

- Rheda2000, Alemanya (2000)

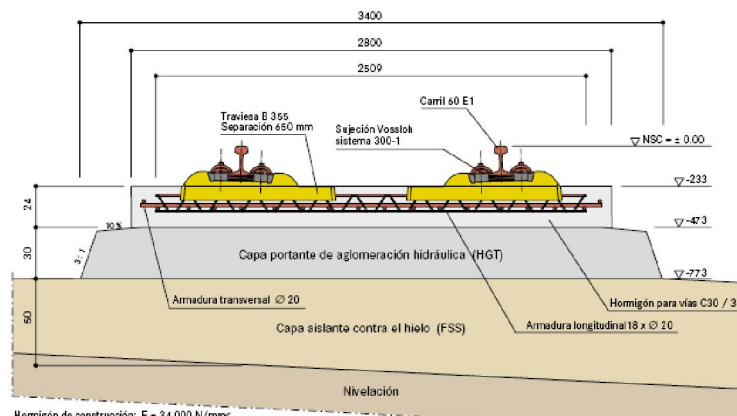


Figura 5. S'elimina l'artesa per una llosa de formigó in situ i també l'elastòmer. La travessa passa a ser bibloc i s'augmenta la quantia d'armadura transversal.

Sistemes prefabricats:

- Shinkansen, Japó (1964)

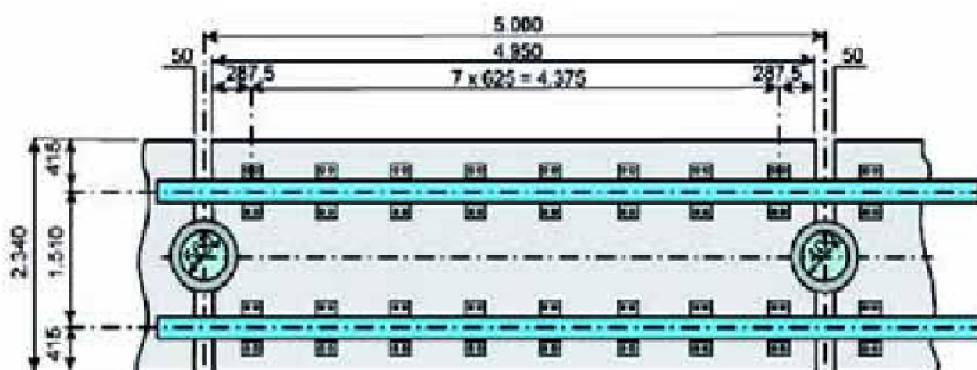


Figura 6. Planta de la via Shinkansen, es tracta de mòduls prefabricats de 5 metres de longitud i que s'acoblen entre ells mitjançant bulons.

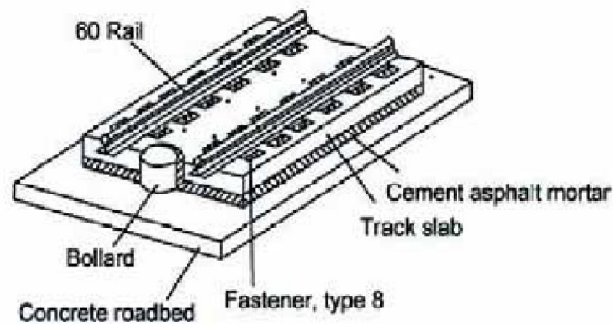


Figura 7. Esquema de la secció els elements característics són el buló que permet l'encaix entre mòduls, la llosa inferior de formigó i la placa prefabricada de formigó. Entre aquestes dues últimes capes s'hi instal·la una capa bituminosa per millorar l'elasticitat del conjunt de via.

- FF – Bögl, Alemanya (2000)

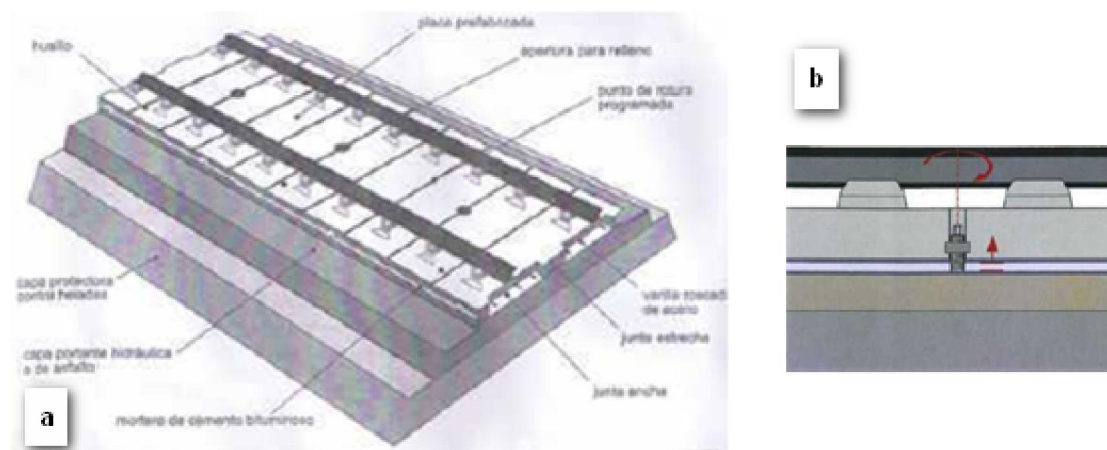


Figura 8. a) Esquema del sistema, es tracta d'una successió de lloses que actuen com a travessa que s'uneixen mitjançant un buló. Les lloses descansen sobre una capa elastomèrica. b) Detall de la unió mitjançant buló entre la llosa inferior de formigó i les lloses prefabricades.

- Mòdul DEDRA, Espanya (2007)

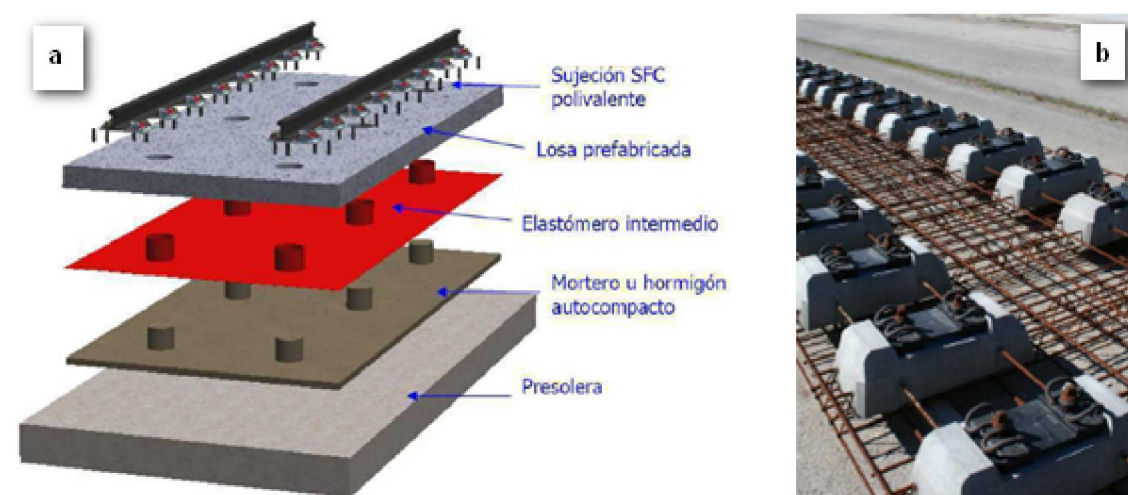


Figura 9. a) Esquema de la composició del sistema, la llosa prefabricada descansa sobre un medi elàstic que li atorga flexibilitat. b) Vista de les travesses amb l'armadura abans de formigonar.

ANNEX III. SECCIONS DE TRAVESSES

En aquest annex es mostren diferents detalls de les travesses que s'utilitzen tan en via de balast com en via amb placa. La travessa AI-04 correspon al primer tipus i la travessa RHEDA2000 correspon al segon.

- AI-04

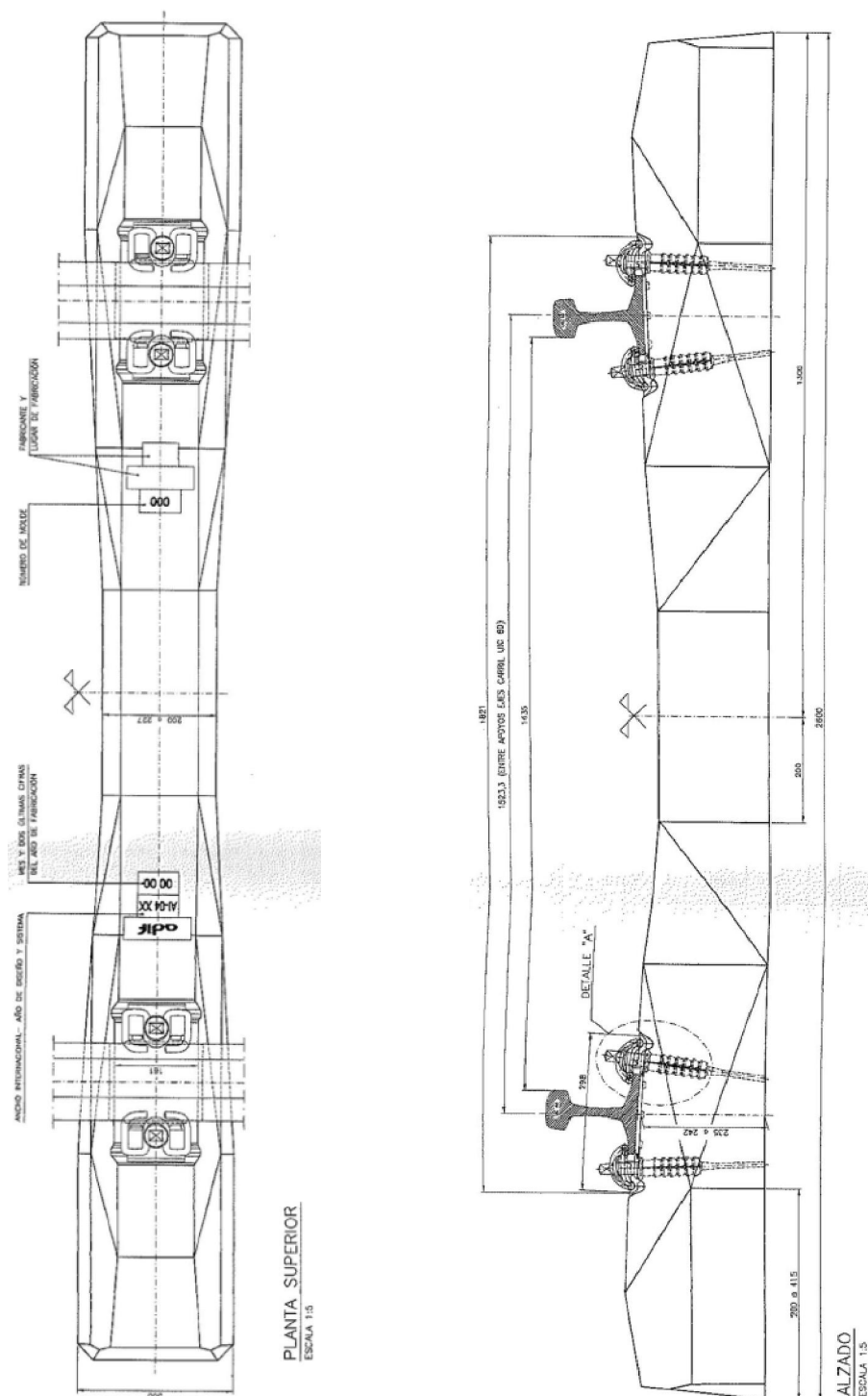
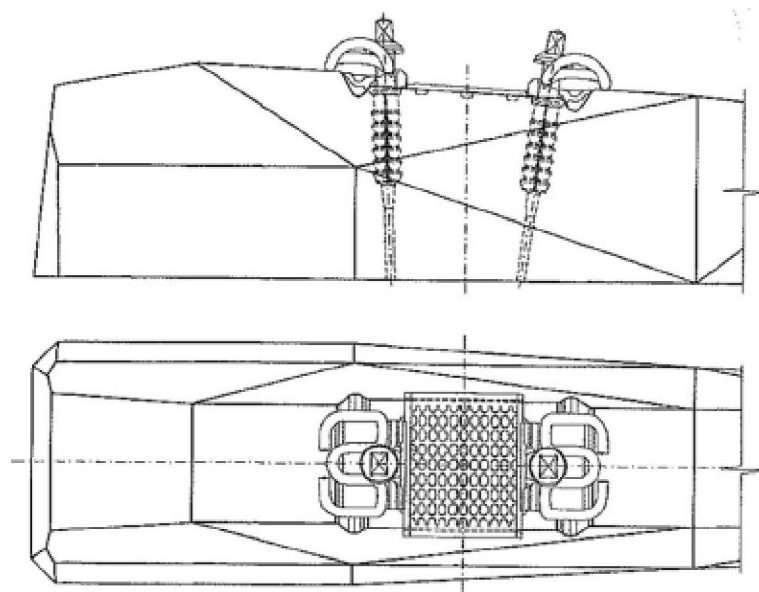


Figura 1. Detalls de la planta superior i alçat de la travessa, extret de [7]



DETALLE DE PREMONTAJE

ESCALA 1:5

Figura 2. Alçat i planta del premuntatge on es veu el tipus de subjecció i la placa d'assentament.

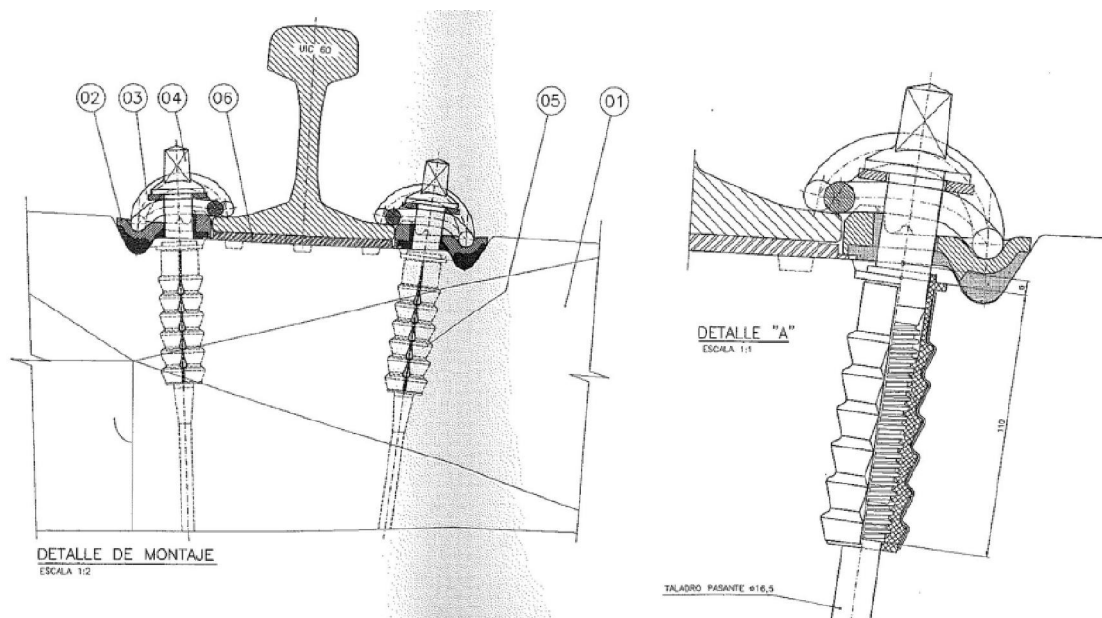


Figura 3. Detall de muntatge del carril i la subjecció

- *RHEDA2000*

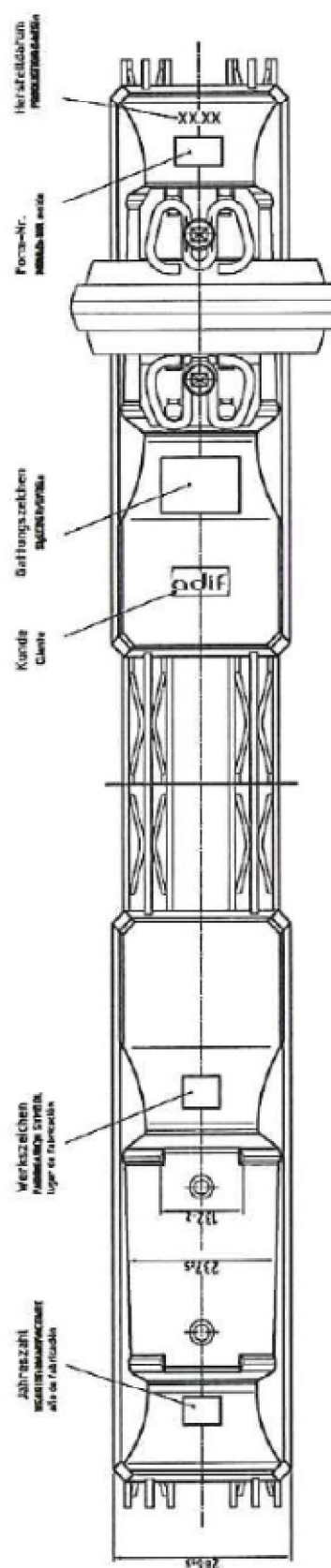
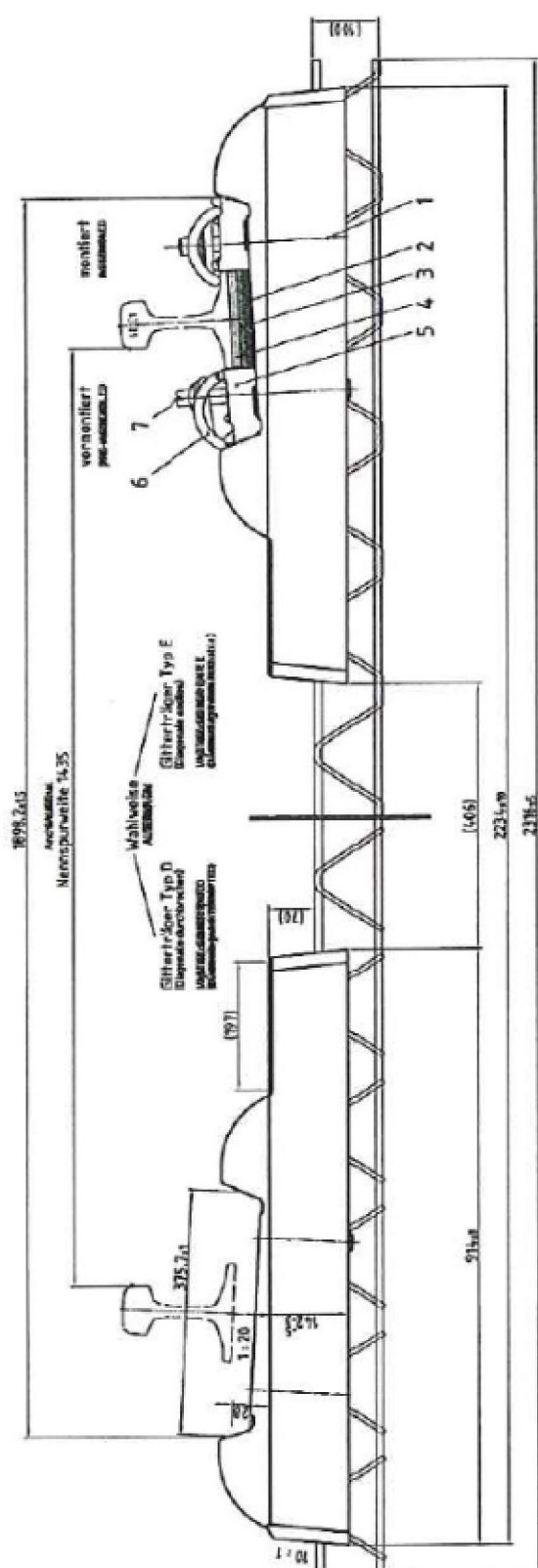


Figura 4. Alçat i planta, extret de [9]

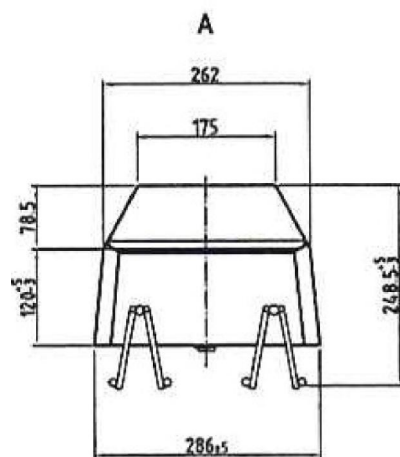


Figura 5. Perfil lateral

ANNEX IV. RESULTATS OBTINGUTS

En el següent annex es mostren el conjunt de càrregues entrades així com les taules corresponents a cada modelització mitjançant el programa de càlcul. Per raons d'espai només es mostren dues taules per a cada modelització, la primera amb els desplaçaments de cada nus i la segona amb les reaccions.

Software utilitzat: SAP2000 v11.0.0 Advanced

Càrregues entrades

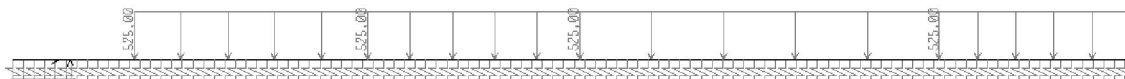
- Carril



- Travessa B-355



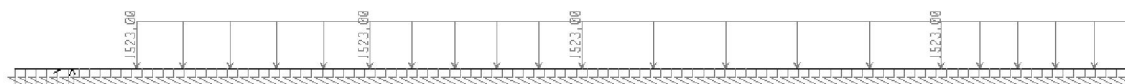
- Travessa AI-04



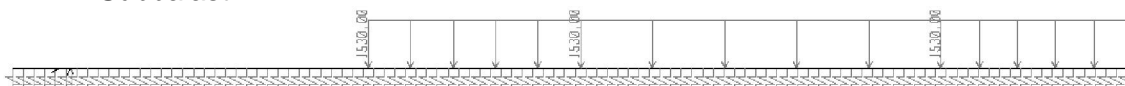
- Formigó



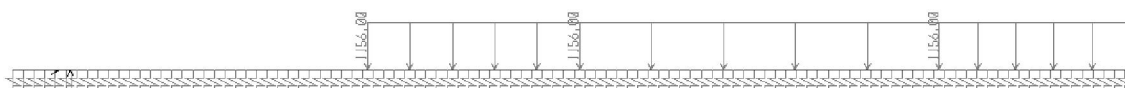
- Balast



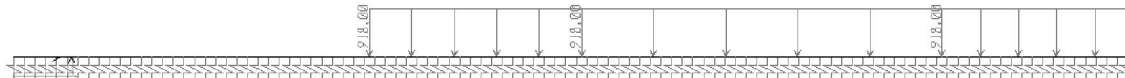
- Subbalast



- Grava



- Arena



Modelització 1

TABLE: Joint Displacements						
Joint	OutputCase	CaseType	U2	U3	R2	posició
Text	Text	Text	mm	mm	Radians	
1	config1	Combination	0	-0,066626	0,000491	L3
2	config1	Combination	0	-1,628195	0,000537	L3
3	config1	Combination	0	0,050834	0,000203	placa
4	config1	Combination	0	-0,136273	0,000504	placa
5	config1	Combination	0	-1,322913	-0,00108	L4
6	config1	Combination	0	-1,89422	0,000055	placa
7	config1	Combination	0	-1,380651	-0,000937	L1
8	config1	Combination	0	-0,009703	-0,000005877	L4
9	config1	Combination	0	0,108071	0,000146	L2
10	config1	Combination	0	-0,27578	-0,000694	L2
11	config1	Combination	0	-0,848974	-0,00118	L1
12	config1	Combination	0	-0,00617	-0,000004084	balast
13	config1	Combination	0	-0,005261	-1,054E-07	balast
14	config1	Combination	0	-0,005376	9,138E-07	balast
15	config1	Combination	0	-0,573818	0,000988	placa
16	config1	Combination	0	-1,295916	0,001226	placa
17	config1	Combination	0	-0,952584	-0,000216	L1
18	config1	Combination	0	-1,149263	0,000764	L1
19	config1	Combination	0	-1,757223	0,000694	L1
20	config1	Combination	0	-1,622999	-0,001024	L1
21	config1	Combination	0	-0,011245	-0,000257	L2
22	config1	Combination	0	0,054842	-0,00003	L2
23	config1	Combination	0	0,04265	0,000033	L2
24	config1	Combination	0	0,024071	0,000015	L2
25	config1	Combination	0	0,027112	-0,000023	L2
26	config1	Combination	0	0,048095	-0,000028	L2
27	config1	Combination	0	0,049597	0,000068	L2
28	config1	Combination	0	-0,052933	0,000346	L2
29	config1	Combination	0	-0,386609	0,000823	L2
30	config1	Combination	0	-1,03476	0,001243	L2
31	config1	Combination	0	-1,778221	0,000726	L2
32	config1	Combination	0	-1,608284	-0,000892	L2
33	config1	Combination	0	-1,044097	-0,000555	L2
34	config1	Combination	0	-1,01646	0,000478	L2
35	config1	Combination	0	-1,55524	0,000926	L2
36	config1	Combination	0	-1,820794	-0,000594	L2
37	config1	Combination	0	-1,096014	-0,001267	L2
38	config1	Combination	0	-0,411067	-0,000901	L2
39	config1	Combination	0	-0,026046	-0,000428	L2
40	config1	Combination	0	0,119015	-0,000105	L2
41	config1	Combination	0	-0,494707	0,000964	L3

42	config1	Combination	0	-1,193476	0,001153	L3
43	config1	Combination	0	-1,683856	-0,000201	L3
44	config1	Combination	0	-1,068793	-0,001171	L3
45	config1	Combination	0	-0,416475	-0,000851	L3
46	config1	Combination	0	-0,06534	-0,000368	L3
47	config1	Combination	0	0,045133	-0,000075	L3
48	config1	Combination	0	0,043926	0,000033	L3
49	config1	Combination	0	0,015433	0,000045	L3
50	config1	Combination	0	-0,006392	0,000025	L3
51	config1	Combination	0	-0,014418	0,000001915	L3
52	config1	Combination	0	-0,008693	-0,000021	L3
53	config1	Combination	0	0,010993	-0,000043	L3
54	config1	Combination	0	0,039792	-0,00004	L3
55	config1	Combination	0	0,049945	0,000046	L3
56	config1	Combination	0	-0,033627	0,000304	L3
57	config1	Combination	0	-0,336533	0,000767	L3
58	config1	Combination	0	-0,947083	0,001168	L3
59	config1	Combination	0	-0,607741	-0,001016	L4
60	config1	Combination	0	-0,15033	-0,000517	L4
61	config1	Combination	0	0,026639	-0,000149	L4
62	config1	Combination	0	0,051014	0,000011	L4
63	config1	Combination	0	0,026575	0,000045	L4
64	config1	Combination	0	0,00187	0,000032	L4
65	config1	Combination	0	-0,011133	0,000013	L4
66	config1	Combination	0	-0,015134	0,000002759	L4
67	config1	Combination	0	-0,003544	0,000007742	balast
68	config1	Combination	0	-0,015225	-6,526E-07	L4
69	config1	Combination	0	-0,014758	-2,521E-07	L4
70	config1	Combination	0	-0,014986	7,449E-07	L4
71	config1	Combination	0	-0,015392	-6,924E-07	L4
72	config1	Combination	0	-0,013519	-0,000008085	L4
73	config1	Combination	0	-0,0048	-0,000024	L4
74	config1	Combination	0	0,015335	-0,000042	L4
75	config1	Combination	0	0,042992	-0,000035	L4
76	config1	Combination	0	0,047473	0,000063	L4
77	config1	Combination	0	-0,05183	0,000341	L4
78	config1	Combination	0	-0,382935	0,000816	L4
79	config1	Combination	0	-1,018656	0,001172	L4
80	config1	Combination	0	-1,663653	0,000347	L4
81	config1	Combination	0	-1,24583	-0,001123	L4
82	config1	Combination	0	-0,54586	-0,000967	L4
83	config1	Combination	0	-0,121583	-0,000469	L4
84	config1	Combination	0	0,033636	-0,000125	L4
85	config1	Combination	0	0,049375	0,000019	L4
86	config1	Combination	0	0,02357	0,000045	L4
87	config1	Combination	0	-0,000153	0,00003	L4

88	config1	Combination	0	-0,012155	0,000012	L4
89	config1	Combination	0	-0,015595	0,000001866	L4
90	config1	Combination	0	-0,015036	-0,000002463	L4
91	config1	Combination	0	-0,012884	-0,000004504	L4
92	config1	Combination	0	-0,00499	-5,412E-07	balast
93	config1	Combination	0	-0,00516	-3,806E-07	balast
94	config1	Combination	0	-0,003866	-0,000006463	balast
95	config1	Combination	0	0,003299	-0,000019	balast
96	config1	Combination	0	0,017792	-0,00002	balast
97	config1	Combination	0	0,004546	0,00002	balast
98	config1	Combination	0	0,019292	0,000017	balast
99	config1	Combination	0	0,015269	-0,000076	balast
100	config1	Combination	0	-0,765592	0,000095	balast
101	config1	Combination	0	-0,092437	-0,000357	balast
102	config1	Combination	0	-0,416992	-0,000672	balast
103	config1	Combination	0	-0,005439	3,101E-07	balast
104	config1	Combination	0	-0,372664	0,000658	balast
105	config1	Combination	0	-0,072537	0,000319	balast
106	config1	Combination	0	0,018445	0,000059	balast
107	config1	Combination	0	0,129919	0,000117	placa

TABLE: Joint Reactions

Joint	OutputCase	CaseType	F1	F2	F3	posició
Text	Text	Text	N	N	N	
1	config1	Combination	0	0	1832,22	L3
2	config1	Combination	0	0	44775,36	L3
3	config1	Combination	0	0	-1143,77	placa
4	config1	Combination	0	0	3066,15	placa
5	config1	Combination	0	0	36380,11	L4
6	config1	Combination	0	0	42619,95	placa
7	config1	Combination	0	0	31064,64	L1
8	config1	Combination	0	0	266,84	L4
9	config1	Combination	0	0	-2431,61	L2
10	config1	Combination	0	0	6205,05	L2
11	config1	Combination	0	0	19101,92	L1
12	config1	Combination	0	0	493,62	balast
13	config1	Combination	0	0	420,91	balast
14	config1	Combination	0	0	430,1	balast
15	config1	Combination	0	0	12910,91	placa
16	config1	Combination	0	0	29158,11	placa
17	config1	Combination	0	0	21433,13	L1
18	config1	Combination	0	0	25858,42	L1
19	config1	Combination	0	0	39537,51	L1
20	config1	Combination	0	0	36517,48	L1
21	config1	Combination	0	0	253,02	L2

22	config1	Combination	0	0	-1233,93	L2
23	config1	Combination	0	0	-959,62	L2
24	config1	Combination	0	0	-541,6	L2
25	config1	Combination	0	0	-610,02	L2
26	config1	Combination	0	0	-1082,13	L2
27	config1	Combination	0	0	-1115,93	L2
28	config1	Combination	0	0	1191	L2
29	config1	Combination	0	0	8698,71	L2
30	config1	Combination	0	0	23282,1	L2
31	config1	Combination	0	0	40009,98	L2
32	config1	Combination	0	0	36186,39	L2
33	config1	Combination	0	0	23492,17	L2
34	config1	Combination	0	0	22870,35	L2
35	config1	Combination	0	0	34992,9	L2
36	config1	Combination	0	0	40967,86	L2
37	config1	Combination	0	0	24660,31	L2
38	config1	Combination	0	0	9249,01	L2
39	config1	Combination	0	0	586,04	L2
40	config1	Combination	0	0	-2677,84	L2
41	config1	Combination	0	0	13604,44	L3
42	config1	Combination	0	0	32820,58	L3
43	config1	Combination	0	0	46306,03	L3
44	config1	Combination	0	0	29391,82	L3
45	config1	Combination	0	0	11453,06	L3
46	config1	Combination	0	0	1796,85	L3
47	config1	Combination	0	0	-1241,15	L3
48	config1	Combination	0	0	-1207,97	L3
49	config1	Combination	0	0	-424,4	L3
50	config1	Combination	0	0	175,79	L3
51	config1	Combination	0	0	396,49	L3
52	config1	Combination	0	0	239,07	L3
53	config1	Combination	0	0	-302,31	L3
54	config1	Combination	0	0	-1094,29	L3
55	config1	Combination	0	0	-1373,49	L3
56	config1	Combination	0	0	924,73	L3
57	config1	Combination	0	0	9254,67	L3
58	config1	Combination	0	0	26044,78	L3
59	config1	Combination	0	0	16712,86	L4
60	config1	Combination	0	0	4134,06	L4
61	config1	Combination	0	0	-732,56	L4
62	config1	Combination	0	0	-1402,88	L4
63	config1	Combination	0	0	-730,81	L4
64	config1	Combination	0	0	-51,43	L4
65	config1	Combination	0	0	306,15	L4
66	config1	Combination	0	0	416,19	L4
67	config1	Combination	0	0	283,54	balast

68	config1	Combination	0	0	418,69	L4
69	config1	Combination	0	0	405,85	L4
70	config1	Combination	0	0	412,12	L4
71	config1	Combination	0	0	423,28	L4
72	config1	Combination	0	0	371,78	L4
73	config1	Combination	0	0	131,99	L4
74	config1	Combination	0	0	-421,72	L4
75	config1	Combination	0	0	-1182,28	L4
76	config1	Combination	0	0	-1305,51	L4
77	config1	Combination	0	0	1425,31	L4
78	config1	Combination	0	0	10530,7	L4
79	config1	Combination	0	0	28013,03	L4
80	config1	Combination	0	0	45750,47	L4
81	config1	Combination	0	0	34260,33	L4
82	config1	Combination	0	0	15011,16	L4
83	config1	Combination	0	0	3343,53	L4
84	config1	Combination	0	0	-925	L4
85	config1	Combination	0	0	-1357,81	L4
86	config1	Combination	0	0	-648,17	L4
87	config1	Combination	0	0	4,19	L4
88	config1	Combination	0	0	334,27	L4
89	config1	Combination	0	0	428,87	L4
90	config1	Combination	0	0	413,5	L4
91	config1	Combination	0	0	354,31	L4
92	config1	Combination	0	0	399,17	balast
93	config1	Combination	0	0	412,76	balast
94	config1	Combination	0	0	309,28	balast
95	config1	Combination	0	0	-263,93	balast
96	config1	Combination	0	0	-1423,39	balast
97	config1	Combination	0	0	-363,64	balast
98	config1	Combination	0	0	-1543,34	balast
99	config1	Combination	0	0	-1221,5	balast
100	config1	Combination	0	0	61247,36	balast
101	config1	Combination	0	0	7394,92	balast
102	config1	Combination	0	0	33359,38	balast
104	config1	Combination	0	0	29813,12	balast
105	config1	Combination	0	0	5802,96	balast
106	config1	Combination	0	0	-1475,64	balast
107	config1	Combination	0	0	-2923,18	placa

Modelització 2

TABLE: Joint Displacements						
Joint	OutputCase	CaseType	U2	U3	R2	posició
Text	Text	Text	mm	mm	Radians	
1	config2	Combination	0	-1,981954	-0,000024	
2	config2	Combination	0	0,05256	-0,000031	placa
3	config2	Combination	0	-1,932371	-0,000367	L1
4	config2	Combination	0	-1,2361	-0,001298	L1
5	config2	Combination	0	-0,50983	-0,000963	L1
6	config2	Combination	0	-0,099404	-0,000446	L1
7	config2	Combination	0	0,066347	0,000013	placa
8	config2	Combination	0	0,022258	0,000195	placa
9	config2	Combination	0	-0,190853	0,000592	placa
10	config2	Combination	0	-0,70157	0,001116	placa
11	config2	Combination	0	-1,984112	-0,000041	
15	config2	Combination	0	-1,707085	0,000018	
16	config2	Combination	0	0,173501	-0,00019	balast
17	config2	Combination	0	0,043025	-0,000031	placa
18	config2	Combination	0	0,045372	-0,000112	L1
19	config2	Combination	0	-1,485598	0,001224	L1
20	config2	Combination	0	-0,499803	-0,000954	L3
21	config2	Combination	0	-1,660128	0,00005	
22	config2	Combination	0	-0,529001	-0,000367	L4
23	config2	Combination	0	-1,664248	-0,000045	
24	config2	Combination	0	-1,727005	0,000038	
28	config2	Combination	0	0,056059	0,000025	L2
29	config2	Combination	0	0,026887	0,00005	L2
30	config2	Combination	0	0,000291	0,000034	L2
31	config2	Combination	0	-0,013829	0,000015	L2
32	config2	Combination	0	-0,018604	0,000003873	L2
33	config2	Combination	0	-0,019276	2,052E-07	L2
34	config2	Combination	0	-0,019223	3,153E-08	L2
35	config2	Combination	0	-0,019219	-0,000001034	L2
36	config2	Combination	0	-0,017422	-0,000007343	L2
37	config2	Combination	0	-0,009504	-0,000022	L2
38	config2	Combination	0	0,009695	-0,000042	L2
39	config2	Combination	0	0,039815	-0,000048	L2
40	config2	Combination	0	0,060436	0,000012	L2
41	config2	Combination	0	0,009616	0,000221	L2
42	config2	Combination	0	-0,227573	0,000643	L2
43	config2	Combination	0	-0,772737	0,001161	L2
44	config2	Combination	0	-1,566051	0,001163	L2
45	config2	Combination	0	-1,884523	-0,000587	L2
46	config2	Combination	0	-1,133111	-0,001321	L2
47	config2	Combination	0	-0,42108	-0,000911	L3

48	config2	Combination	0	-0,0532	-0,000377	L3
49	config2	Combination	0	0,055535	-0,000067	L3
50	config2	Combination	0	0,048865	0,000041	L3
51	config2	Combination	0	0,016601	0,000049	L3
52	config2	Combination	0	-0,006598	0,000026	L3
53	config2	Combination	0	-0,014178	1,538E-08	L3
54	config2	Combination	0	-0,006728	-0,000025	L3
55	config2	Combination	0	0,015102	-0,000045	L3
56	config2	Combination	0	0,04374	-0,000034	L3
57	config2	Combination	0	0,045087	0,000074	L3
58	config2	Combination	0	-0,06522	0,000367	L3
59	config2	Combination	0	-0,416093	0,00085	L3
60	config2	Combination	0	-1,068105	0,001171	L3
61	config2	Combination	0	-1,683223	0,000202	L3
62	config2	Combination	0	-1,194275	-0,001149	L3
63	config2	Combination	0	-0,079394	-0,000478	L4
64	config2	Combination	0	0,08875	-0,000146	L4
65	config2	Combination	0	0,108872	0,000066	L4
66	config2	Combination	0	0,003193	0,000334	L4
67	config2	Combination	0	-0,308582	0,000761	L4
68	config2	Combination	0	-0,904667	0,001134	L4
69	config2	Combination	0	-1,565727	0,000534	L4
70	config2	Combination	0	-1,292328	-0,00091	L4
71	config2	Combination	0	-0,772122	-0,00046	L4
72	config2	Combination	0	-0,798801	0,000535	L4
73	config2	Combination	0	-1,344848	0,000881	L4
74	config2	Combination	0	-1,526589	-0,000661	L4
75	config2	Combination	0	-0,848583	-0,001111	L4
76	config2	Combination	0	-0,286074	-0,000692	L4
77	config2	Combination	0	-0,01985	-0,000259	L4
78	config2	Combination	0	0,046978	-0,000031	L4
79	config2	Combination	0	0,034185	0,000036	L4
80	config2	Combination	0	0,012599	0,000022	L4
81	config2	Combination	0	0,010115	-0,000015	L4
82	config2	Combination	0	0,029407	-0,000039	L4
83	config2	Combination	0	0,050005	0,000001473	L4
84	config2	Combination	0	0,012103	0,000187	L4
85	config2	Combination	0	-0,1976	0,000587	L4
86	config2	Combination	0	-0,701417	0,001076	L4
87	config2	Combination	0	-1,426182	0,000981	L4
88	config2	Combination	0	-1,554949	-0,000701	L4
89	config2	Combination	0	-0,923903	-0,000925	L4
90	config2	Combination	0	-0,493213	0,000278	balast
91	config2	Combination	0	-0,755668	-0,00008	balast
92	config2	Combination	0	-0,375499	-0,000643	balast
93	config2	Combination	0	-0,075336	-0,00035	balast

94 config2 Combination 0 0,059216 -0,000194 balast

TABLE: Joint Reactions						
Joint	OutputCase	CaseType	F1	F2	F3	posició
Text	Text	Text	N	N	N	
2	config2	Combination	0	0	-1182,59	placa
3	config2	Combination	0	0	43478,36	L1
4	config2	Combination	0	0	27812,25	L1
5	config2	Combination	0	0	11471,16	L1
6	config2	Combination	0	0	2236,6	L1
7	config2	Combination	0	0	-1492,81	placa
8	config2	Combination	0	0	-500,81	placa
9	config2	Combination	0	0	4294,18	placa
10	config2	Combination	0	0	15785,32	placa
18	config2	Combination	0	0	-1020,87	L1
19	config2	Combination	0	0	33425,96	L1
20	config2	Combination	0	0	13744,59	L3
22	config2	Combination	0	0	42,32	L4
28	config2	Combination	0	0	-1261,33	L2
29	config2	Combination	0	0	-604,96	L2
30	config2	Combination	0	0	-6,55	L2
31	config2	Combination	0	0	311,14	L2
32	config2	Combination	0	0	418,58	L2
33	config2	Combination	0	0	433,71	L2
34	config2	Combination	0	0	432,52	L2
35	config2	Combination	0	0	432,42	L2
36	config2	Combination	0	0	391,99	L2
37	config2	Combination	0	0	213,85	L2
38	config2	Combination	0	0	-218,13	L2
39	config2	Combination	0	0	-895,83	L2
40	config2	Combination	0	0	-1359,81	L2
41	config2	Combination	0	0	-216,36	L2
42	config2	Combination	0	0	5120,4	L2
43	config2	Combination	0	0	17386,58	L2
44	config2	Combination	0	0	35236,14	L2
45	config2	Combination	0	0	42401,76	L2
46	config2	Combination	0	0	25494,99	L2
47	config2	Combination	0	0	11579,7	L3
48	config2	Combination	0	0	1463	L3
49	config2	Combination	0	0	-1527,22	L3
50	config2	Combination	0	0	-1343,77	L3
51	config2	Combination	0	0	-456,52	L3
52	config2	Combination	0	0	181,45	L3
53	config2	Combination	0	0	389,91	L3
54	config2	Combination	0	0	185,02	L3

55	config2	Combination	0	0	-415,3	L3
56	config2	Combination	0	0	-1202,84	L3
57	config2	Combination	0	0	-1239,89	L3
58	config2	Combination	0	0	1793,54	L3
59	config2	Combination	0	0	11442,57	L3
60	config2	Combination	0	0	29372,9	L3
61	config2	Combination	0	0	46288,64	L3
62	config2	Combination	0	0	32842,57	L3
63	config2	Combination	0	0	2183,33	L4
64	config2	Combination	0	0	-2440,62	L4
65	config2	Combination	0	0	-2993,99	L4
66	config2	Combination	0	0	-87,8	L4
67	config2	Combination	0	0	8486,01	L4
68	config2	Combination	0	0	24878,35	L4
69	config2	Combination	0	0	43057,49	L4
70	config2	Combination	0	0	35539,03	L4
71	config2	Combination	0	0	21233,35	L4
72	config2	Combination	0	0	21967,03	L4
73	config2	Combination	0	0	36983,32	L4
74	config2	Combination	0	0	41981,19	L4
75	config2	Combination	0	0	23336,02	L4
76	config2	Combination	0	0	7867,04	L4
77	config2	Combination	0	0	545,88	L4
78	config2	Combination	0	0	-1291,89	L4
79	config2	Combination	0	0	-940,08	L4
80	config2	Combination	0	0	-346,46	L4
81	config2	Combination	0	0	-278,16	L4
82	config2	Combination	0	0	-808,69	L4
83	config2	Combination	0	0	-1375,14	L4
84	config2	Combination	0	0	-332,84	L4
85	config2	Combination	0	0	5434	L4
86	config2	Combination	0	0	19288,97	L4
87	config2	Combination	0	0	39220,02	L4
88	config2	Combination	0	0	42761,11	L4
89	config2	Combination	0	0	25407,35	L4
90	config2	Combination	0	0	39457,06	balast
91	config2	Combination	0	0	60453,46	balast
92	config2	Combination	0	0	30039,95	balast
93	config2	Combination	0	0	6026,87	balast
94	config2	Combination	0	0	-4737,31	balast

Modelització 3

TABLE: Joint Displacements						
Joint	OutputCase	CaseType	U2	U3	R2	posició
Text	Text	Text	mm	mm	Radians	
133	config3	Combination	0	-1,001493	-0,000755	placa
134	config3	Combination	0	-0,680393	-0,000161	L1
135	config3	Combination	0	-0,588351	0,000071	L2
136	config3	Combination	0	-0,497505	0,000017	L2
137	config3	Combination	0	-0,528189	-0,000209	L1
138	config3	Combination	0	-0,627458	0,000049	L3
139	config3	Combination	0	-0,646051	-0,000028	L3
140	config3	Combination	0	-0,622729	-0,000041	L4
141	config3	Combination	0	-0,56025	-0,000096	L4
142	config3	Combination	0	-0,484696	-0,000103	balast
143	config3	Combination	0	-0,41217	0,000345	placa
144	config3	Combination	0	-0,637866	0,000515	placa
145	config3	Combination	0	-1,039567	0,000769	placa
146	config3	Combination	0	-1,446786	-0,00004	placa
147	config3	Combination	0	-0,825034	0,00059	L1
148	config3	Combination	0	-1,312527	0,000627	L1
149	config3	Combination	0	-1,248417	-0,000706	L1
150	config3	Combination	0	-0,769079	-0,000631	L1
151	config3	Combination	0	-0,528484	0,000053	L2
152	config3	Combination	0	-0,554794	0,00003	L2
153	config3	Combination	0	-0,564517	0,000004363	L2
154	config3	Combination	0	-0,560529	-0,000017	L2
155	config3	Combination	0	-0,544771	-0,000033	L2
156	config3	Combination	0	-0,524261	-0,000018	L2
157	config3	Combination	0	-0,534943	0,000103	L2
158	config3	Combination	0	-0,668968	0,000417	L2
159	config3	Combination	0	-1,044929	0,00082	L2
160	config3	Combination	0	-1,580018	0,00054	L2
161	config3	Combination	0	-1,398904	-0,000801	L2
162	config3	Combination	0	-0,926457	-0,000458	L2
163	config3	Combination	0	-0,903525	0,00039	L2
164	config3	Combination	0	-1,349883	0,000818	L2
165	config3	Combination	0	-1,610074	-0,000431	L2
166	config3	Combination	0	-1,085942	-0,000839	L2
167	config3	Combination	0	-0,688234	-0,000452	L2
168	config3	Combination	0	-0,537314	-0,000122	L2
169	config3	Combination	0	-0,5211	0,000018	L2
170	config3	Combination	0	-0,548626	0,000059	L2
171	config3	Combination	0	-0,641716	-1,726E-07	L3
172	config3	Combination	0	-0,629861	-0,000025	L3

173	config3	Combination	0	-0,620351	0,000031	L3
174	config3	Combination	0	-0,685726	0,000257	L3
175	config3	Combination	0	-0,947882	0,000659	L3
176	config3	Combination	0	-1,44633	0,000774	L3
177	config3	Combination	0	-1,594273	-0,000561	L3
178	config3	Combination	0	-1,08508	-0,00066	L3
179	config3	Combination	0	-0,893816	0,0001	L3
180	config3	Combination	0	-1,194074	0,000757	L3
181	config3	Combination	0	-1,672085	0,000193	L3
182	config3	Combination	0	-1,302046	-0,000821	L3
183	config3	Combination	0	-0,854811	-0,000548	L3
184	config3	Combination	0	-0,655044	-0,000181	L3
185	config3	Combination	0	-0,617592	-0,000005977	L3
186	config3	Combination	0	-0,633246	0,000032	L3
187	config3	Combination	0	-0,650276	0,000019	L3
188	config3	Combination	0	-0,655327	-0,000003319	L3
189	config3	Combination	0	-0,601537	-0,000007099	L4
190	config3	Combination	0	-0,627265	0,000149	L4
191	config3	Combination	0	-0,801065	0,000496	L4
192	config3	Combination	0	-1,218719	0,000806	L4
193	config3	Combination	0	-1,646552	-0,000024	L4
194	config3	Combination	0	-1,198869	-0,000767	L4
195	config3	Combination	0	-0,869897	-0,000164	L4
196	config3	Combination	0	-1,019953	0,000608	L4
197	config3	Combination	0	-1,520339	0,000639	L4
198	config3	Combination	0	-1,454452	-0,000727	L4
199	config3	Combination	0	-0,952467	-0,000681	L4
200	config3	Combination	0	-0,675359	-0,000278	L4
201	config3	Combination	0	-0,60124	-0,000041	L4
202	config3	Combination	0	-0,60867	0,000028	L4
203	config3	Combination	0	-0,627627	0,000025	L4
204	config3	Combination	0	-0,63737	0,000007046	L4
205	config3	Combination	0	-0,636032	-0,000012	L4
206	config3	Combination	0	-0,623596	-0,000029	L4
207	config3	Combination	0	-0,604271	-0,000021	L4
208	config3	Combination	0	-0,607938	0,00008	L4
209	config3	Combination	0	-0,719769	0,000367	L4
210	config3	Combination	0	-1,060232	0,000763	L4
211	config3	Combination	0	-1,567249	0,000519	L4
212	config3	Combination	0	-1,390597	-0,000776	L4
213	config3	Combination	0	-0,938399	-0,000437	L4
214	config3	Combination	0	-0,9165	0,000372	L4
215	config3	Combination	0	-1,34291	0,000791	L4
216	config3	Combination	0	-1,596354	-0,000413	L4
217	config3	Combination	0	-1,100641	-0,000778	L4
218	config3	Combination	0	-0,74306	-0,000394	L4

219	config3	Combination	0	-0,617612	-0,000105	L4
220	config3	Combination	0	-0,593796	-0,000036	L4
221	config3	Combination	0	-0,444196	-0,000041	balast
222	config3	Combination	0	-0,431708	-0,000016	balast
223	config3	Combination	0	-0,422207	-0,000002	balast
224	config3	Combination	0	-0,410596	0,000001453	balast
225	config3	Combination	0	-0,437362	0,000148	balast
226	config3	Combination	0	-0,694249	-0,000556	balast
227	config3	Combination	0	-1,132989	-0,00051	balast
228	config3	Combination	0	-1,0056	0,000662	balast
229	config3	Combination	0	-0,609206	0,000488	balast
230	config3	Combination	0	-0,443438	0,000097	balast
231	config3	Combination	0	-0,407901	0,000026	balast
232	config3	Combination	0	-0,417261	-0,000096	balast
233	config3	Combination	0	-0,541721	-0,000388	balast
234	config3	Combination	0	-0,882931	-0,000678	balast
235	config3	Combination	0	-1,202547	0,00018	balast
236	config3	Combination	0	-0,784329	0,000645	balast
237	config3	Combination	0	-0,538636	0,000082	balast
240	config3	Combination	0	-1,055662	-0,000768	
241	config3	Combination	0	-1,231688	-0,000786	
242	config3	Combination	0	-1,240729	-0,000887	
243	config3	Combination	0	-0,623107	0,000012	
244	config3	Combination	0	-0,650984	-0,000019	
245	config3	Combination	0	-0,76201	0,000442	
246	config3	Combination	0	-0,679867	-0,000521	
247	config3	Combination	0	-1,26337	0,0001	
248	config3	Combination	0	-1,678086	0,000149	
249	config3	Combination	0	-1,679136	0,000189	
250	config3	Combination	0	-0,613864	0,000039	
251	config3	Combination	0	-0,665258	-0,000012	
252	config3	Combination	0	-0,553325	-0,000169	
253	config3	Combination	0	-1,292098	0,00065	
254	config3	Combination	0	-1,496766	0,000044	
255	config3	Combination	0	-1,713305	0,000014	
256	config3	Combination	0	-1,70363	-0,000023	
257	config3	Combination	0	-1,740205	-0,000062	
258	config3	Combination	0	-1,700956	0,000056	
259	config3	Combination	0	-1,708818	0,000045	
260	config3	Combination	0	-1,701503	0,000015	
261	config3	Combination	0	-1,691002	-0,000023	
262	config3	Combination	0	-1,274826	-0,000067	
263	config3	Combination	0	-1,231679	0,00006	
264	config3	Combination	0	-0,198624	0,000408	placa
265	config3	Combination	0	-0,807585	-0,000518	
266	config3	Combination	0	-0,506955	-0,000061	

267	config3	Combination	0	-0,621974	0,000065
268	config3	Combination	0	-0,64932	-0,000038
269	config3	Combination	0	-0,536974	-0,00012
270	config3	Combination	0	-0,49243	0,000136

TABLE: Joint Reactions						
Joint	OutputCase	CaseType	F1	F2	F3	posició
Text	Text	Text	N	N	N	
133	config3	Combination	0	0	56574,36	placa
134	config3	Combination	0	0	38435,4	L1
135	config3	Combination	0	0	27505,42	L2
136	config3	Combination	0	0	23258,37	L2
137	config3	Combination	0	0	29837,39	L1
138	config3	Combination	0	0	32169,79	L3
139	config3	Combination	0	0	33123,04	L3
140	config3	Combination	0	0	32836,5	L4
141	config3	Combination	0	0	29541,99	L4
142	config3	Combination	0	0	37050,18	balast
143	config3	Combination	0	0	23283,51	placa
144	config3	Combination	0	0	36033,07	placa
145	config3	Combination	0	0	58725,17	placa
146	config3	Combination	0	0	81728,93	placa
147	config3	Combination	0	0	46606,16	L1
148	config3	Combination	0	0	74144,64	L1
149	config3	Combination	0	0	70523,08	L1
150	config3	Combination	0	0	43445,25	L1
151	config3	Combination	0	0	24706,63	L2
152	config3	Combination	0	0	25936,6	L2
153	config3	Combination	0	0	26391,16	L2
154	config3	Combination	0	0	26204,74	L2
155	config3	Combination	0	0	25468,05	L2
156	config3	Combination	0	0	24509,21	L2
157	config3	Combination	0	0	25008,6	L2
158	config3	Combination	0	0	31274,25	L2
159	config3	Combination	0	0	48850,44	L2
160	config3	Combination	0	0	73865,85	L2
161	config3	Combination	0	0	65398,74	L2
162	config3	Combination	0	0	43311,85	L2
163	config3	Combination	0	0	42239,81	L2
164	config3	Combination	0	0	63107,02	L2
165	config3	Combination	0	0	75270,97	L2
166	config3	Combination	0	0	50767,8	L2
167	config3	Combination	0	0	32174,94	L2
168	config3	Combination	0	0	25119,43	L2
169	config3	Combination	0	0	24361,45	L2

170	config3	Combination	0	0	25648,28	L2
171	config3	Combination	0	0	32900,76	L3
172	config3	Combination	0	0	32292,96	L3
173	config3	Combination	0	0	31805,41	L3
174	config3	Combination	0	0	35157,19	L3
175	config3	Combination	0	0	48597,88	L3
176	config3	Combination	0	0	74153,33	L3
177	config3	Combination	0	0	81738,4	L3
178	config3	Combination	0	0	55632,08	L3
179	config3	Combination	0	0	45825,94	L3
180	config3	Combination	0	0	61220,17	L3
181	config3	Combination	0	0	85727,8	L3
182	config3	Combination	0	0	66755,91	L3
183	config3	Combination	0	0	43826,14	L3
184	config3	Combination	0	0	33584,11	L3
185	config3	Combination	0	0	31663,94	L3
186	config3	Combination	0	0	32466,54	L3
187	config3	Combination	0	0	33339,64	L3
188	config3	Combination	0	0	33598,64	L3
189	config3	Combination	0	0	31719,06	L4
190	config3	Combination	0	0	33075,68	L4
191	config3	Combination	0	0	42240,17	L4
192	config3	Combination	0	0	64263,06	L4
193	config3	Combination	0	0	86822,68	L4
194	config3	Combination	0	0	63216,38	L4
195	config3	Combination	0	0	45869,69	L4
196	config3	Combination	0	0	53782,14	L4
197	config3	Combination	0	0	80167,47	L4
198	config3	Combination	0	0	76693,26	L4
199	config3	Combination	0	0	50223,57	L4
200	config3	Combination	0	0	35611,69	L4
201	config3	Combination	0	0	31703,37	L4
202	config3	Combination	0	0	32095,19	L4
203	config3	Combination	0	0	33094,76	L4
204	config3	Combination	0	0	33608,51	L4
205	config3	Combination	0	0	33537,98	L4
206	config3	Combination	0	0	32882,19	L4
207	config3	Combination	0	0	31863,2	L4
208	config3	Combination	0	0	32056,58	L4
209	config3	Combination	0	0	37953,44	L4
210	config3	Combination	0	0	55906,03	L4
211	config3	Combination	0	0	82641,04	L4
212	config3	Combination	0	0	73326,18	L4
213	config3	Combination	0	0	49481,77	L4
214	config3	Combination	0	0	48327,05	L4
215	config3	Combination	0	0	70811,62	L4

216	config3	Combination	0	0	84175,77	L4
217	config3	Combination	0	0	58036,8	L4
218	config3	Combination	0	0	39181,57	L4
219	config3	Combination	0	0	32566,66	L4
220	config3	Combination	0	0	31310,88	L4
221	config3	Combination	0	0	33954,32	balast
222	config3	Combination	0	0	32999,77	balast
223	config3	Combination	0	0	32273,49	balast
224	config3	Combination	0	0	31385,94	balast
225	config3	Combination	0	0	33431,94	balast
226	config3	Combination	0	0	53068,36	balast
227	config3	Combination	0	0	86605,68	balast
228	config3	Combination	0	0	76868,08	balast
229	config3	Combination	0	0	46567,71	balast
230	config3	Combination	0	0	33896,4	balast
231	config3	Combination	0	0	31179,96	balast
232	config3	Combination	0	0	31895,39	balast
233	config3	Combination	0	0	41409,17	balast
234	config3	Combination	0	0	67491,24	balast
235	config3	Combination	0	0	91922,68	balast
236	config3	Combination	0	0	59954,08	balast
237	config3	Combination	0	0	41173,32	balast
264	config3	Combination	0	0	11220,26	placa

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

Referències

- [1] López Pita, A. *Infraestructuras ferroviarias*. Edicions UPC, 2006.
- [2] Ladrón, A. *Mantenimiento de infraestructura y vía AVE*. Explotació de línies de ferrocarrils, curs 2008-09. Apunts de l'assignatura.
- [3] Patentes Talgo S.A. *Talgo 350*. Catàleg comercial, www.talgo.com
- [4] Estradé Panadés J.M. i López Pita, A. *Antes y después de la aplicación de los métodos numéricos en la investigación del balasto*. Revista de Obras Públicas, núm. 3318, pág. 67-74, febrero 1993.
- [5] León, M. *Diccionario de tecnología ferroviaria*. Babel 2000 S.A., ediciones Díaz de Santos S.A., Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Madrid 2005.
- [6] Reunión de Ingenieros. *Mecánica de suelos*. Editores técnicos asociados, s.a., pág. 2, Barcelona 1975.
- [7] Andaluza de Traviesas S.A. (ANTRASA), *Traviesa AI-04/ UIC 60*. Especificaciones del producto, www.antrasa.com
- [8] *Transporte ferroviario*. Ingeniería del transporte, curso 2005-06. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de A Coruña.
- [9] Cruz Abad, J. *Superestructura de vía*. Seminario de FFCC de Alta Velocidad, Madrid 7 de octubre de 2009, iiR España.
- [10] iiR España. *Seminario de superestructura de vía en placa*, Madrid 26 de noviembre de 2009
- [11] RAIL.ONE GmbH Pflleiderer track systems. *RHEDA2000, Vía en placa sobre asiento de hormigón*. Catàleg comercial, www.railone.es
- [12] *Geotecnia y Cimientos*. ref GeoCim-01_19/11/06 www.demecanica.com/Geotecnia/geotecnia.htm
- [13] Puertos del Estado. *Fundamentos teóricos del dimensionamiento*, ROM 4.1-94 Anejo A. www.puertos.es/export/download/ROM_PDFs/ROM4194anejoA.pdf
- [14] Oliver, X. i Agelet de Saracibar, A. *Mecànica de medis continus per a enginyers*. Edicions UPC, 2003.
- [15] Prat P. i Ledesma A. *Mecànica del sòl*. Apunts de l'assignatura. 3r curs ETSECCPB, UPC.
- [16] Alias, J. y Valdes, A. *La vía del ferrocarril*. Bellisco, librería editoria, 1990.

- [17] Alvarez Loranca R. *Control de la compactación de las capas granulares*. Geocisa <http://www.geocisacarreteras.com/>
- [18] Miralbés R. y Castejón L. *Calculo de la rigidez vertical de la vía en función de las rigideces verticales de la placa de asiento y del sistema balasto-plataforma en vías de alta velocidad*. Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza.
- [19] FCC Construcción. *Premios y distinciones 2008*. www.fccco.es
- [20] Nasarre J. *Transiciones obra de paso-terraplén. Los Bloques técnicos en las vías ferroviarias. Proyecto y conservación*. Fundación Caminos de Hierro, 14 de marzo de 2007.
- [21] European Railway Review. *The Rheda2000 ballastless track system*. p. 44-54. Issue 01 – 2003.
- [22] Freudenstein F. *Ballasted track systems for high speed traffic*. European Railway Review conference, 20th september 2004
- [23] CDM-USP. *Suelas bajo traviesa*. Catàleg comercial
- [24] Muñoz Amariles M E, Álvarez González J I. *Metro de Medellín: modelo para la caracterización del comportamiento dinámico del sistema vehículo/vía*. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.
- [25] Comisión Permanente del Hormigón. *Instrucción de Hormigón Estructural EHE 08*. Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones, Madrid, 2008.
- [26] Peña M. *Tramos de ensayo de vía en placa en la línea del corredor mediterráneo para su explotación a alta velocidad. I. Diseño y construcción*. Revista de Obras Públicas, p. 57 - 68, marzo 2003, nº 3.431.
- [27] Katsutoshi A, Hifumi A i Haga O. *Recent developments of slab track in Japan*. Railway Technical Research Institute.
- [28] Mörscher J. *Development of ballastless track in Germany. 2. And 3. December 1999*. Delft, University of Technology.
- [29] Koriath H. *Objetivación de la elección de sistema entre la vía sobre balasto y la vía sobre losa en la DB AG*. ETR- Eisenbahntechnische Rundschau, Darmstadt, vol.52, nº3, marzo 2003, p.113-122.
- [30] DARR,E. *La vía sobre losa: construcción, tipos, estabilidad de la vía, mantenimiento y comparación de sistemas*. ETR., vol. 49, nº 3, marzo 2000, págs. 138-148.
- [31] Estradé JM. *El futuro de la superestructura de vía en placa en las nuevas líneas europeas de alta velocidad*.
- [32] Estradé JM. *Sistemas de vía sin balasto*.
- [33] Kissel, E., Missier, M. *The Use of Ballastless Track on the Lines of Deutsche Bahn AG- Interaction between requirements, operating trials and further development*.

- [34] Koyama, Y. *Railway construction in Japan*. Railway Technology Today 1. December 1997.
- [35] Melis, M., Jiménez, I. *Vía en placa en la ampliación del metro de Madrid. Reducción de los costes de mantenimiento*. Ciencia y técnica de la ingeniería civil. Revista de obras públicas, abril 1998/Nº 3373.
- [36] Klösters F. *Track Trials Next Month*. International Railway Journal. September 1998.
- [37] Koriath H. *Bringing Objectivity into System Decisions between Ballasted Track and Slab Track at Deutsche Bahn*.
- [38] Rhodes, D. *Slab track evolves to meet operator's expectations*.
- [39] Darr, E. *Ballastless Track: Design, Types, Track Stability, Maintenance and System Comparison*.
- [40] Estrade JM. *La superestructura de vía sin balasto: perspectivas de aplicación en las nuevas líneas de alta velocidad*. Revista de obras públicas. Septiembre 1991. Pág. 9 a 28.
- [41] Estrade JM. *La superestructura de vía en placa en las nuevas líneas de alta velocidad de nuestro país*. Revista de obras públicas / Enero 1998 / Nº 3372.
- [42] Escolano, J. *La "vía en placa" en la DB AG*. Revista de obras públicas / Diciembre 1998 / Nº 3382.
- [43] Barber, F. *Seis tipos de vía en placa se prueban en Valencia*. <http://www.lineasdeltren.com/lineas12/empresas02.htm>
- [44] Jornada de reflexión y debate. *Vía con balasto versus vía en placa. Criterios técnico-económicos para una decisión*. INECO-TIFSA. Madrid, junio 2007.

